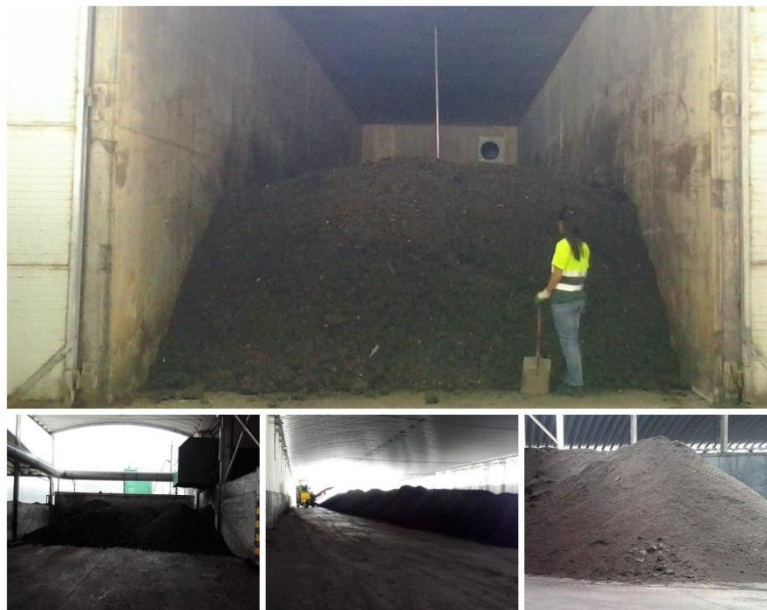




Estudo da Compostagem na ERSUC - otimização de variáveis no CITVRSU de Coimbra

Inês Filipa Monteiro Penacho



2016



**Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental**



Estudo da Compostagem na ERSUC - otimização de variáveis no CITVRSU de Coimbra

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Coimbra para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental, realizada sob a orientação científica da Engenheira Filipa Nunes Rascão (ERSUC, Resíduos Sólidos do Centro, S.A. - CITVRSU Coimbra) e da Doutora Célia Maria Dias Ferreira (CERNAS).

Inês Filipa Monteiro Penacho

2016



**Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental**



Agradecimentos

Concluída esta etapa tão importante da minha vida, não poderia deixar de prestar o meu agradecimento aqueles que deram a sua contribuição, de formas diversas, mas cada uma com a sua importância e papel no desenvolvimento e finalização desta dissertação.

Este trabalho não era possível sem a contribuição da ERSUC S.A., pela oportunidade de estágio que me proporcionou e de certa forma por me ter deixado contribuir com os meus conhecimentos.

Agradeço à Dr.^a Célia Ferreira e à Eng.^a Filipa Rascão por terem aceite serem minhas orientadoras, pelos conhecimentos, sugestões e ajuda que transmitiram ao longo do estágio para uma boa persecução deste estudo e aquando da realização desta dissertação de mestrado.

À Ana Coelho, Técnica de Laboratório do CITVRSU de Coimbra, pela integração e incansável ajuda, pelas sugestões, amizade e companhia.

À Eng.^a Leonor Pato e ao Sr. Jorge pela ajuda prestada em todo o trabalho prático realizado no Laboratório de Solos e Fertilidade da ESAC. Agradeço também à Carolina Batista e à Maria Almeida pela ajuda e companheirismo prestado no laboratório.

Este estudo decorreu com apoio do Centro de Estudos de Recursos Naturais, Ambiente e Sociedade (CERNAS), Unidade de investigação financiada por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto UID/AMB/00681/2013, ao qual agradeço o financiamento das análises realizadas no Laboratório de Solos e Fertilidade da ESAC.

Aos meus queridos amigos por estarem sempre presentes quando necessário, por me terem acompanhado de perto nestes últimos meses de trabalho, sem mencionar nomes, um muito obrigado.

Ficando para último o mais importante, aos meus pais por terem apostado na minha formação académica, por todo o amor, carinho, paciência, encorajamento, confiança e valores que me transmitiram. Também agradeço ao João pelo apoio incondicional, cumplicidade e por tornar os meus dias mais felizes.

A todos vós, e a alguns que possa ter falhado, muito obrigada!

Resumo

O presente trabalho foi realizado nas instalações do Centro Integrado de Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos (CITVRSU) de Coimbra da ERSUC - Resíduos Sólidos do Centro, S.A., especificamente na unidade de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB). Teve como objetivo otimizar a variável altura nas pilhas de compostagem em túnel reator com o intuito de minimizar o tempo de permanência em túnel.

As biomassas utilizadas para a constituição das pilhas, designadas industrialmente de sólidos de centrífuga, eram provenientes da digestão anaeróbia dos resíduos urbanos biodegradáveis (RUB), obtidos na recolha indiferenciada na região Centro, especificamente na área geográfica de atuação do CITVRSU de Coimbra. A otimização da altura nas pilhas de compostagem em túnel reator foi estudada através de quatro ensaios (com uma réplica de cada), tendo-se variado a altura da pilha (1,50, 1,80 e 2,00 m) e o rácio entre o material estruturante e os sólidos de centrífuga. Durante o ensaio em túnel foi monitorizado o processo de compostagem no que diz respeito à temperatura e concentração/teor de oxigénio (O_2) e arejamento, através do *software* SCADA, com o intuito de controlar as principais variáveis.

Para o acompanhamento do processo de compostagem foram realizadas análises físico-químicas (caracterização física da matéria à entrada de *pulper*, sólidos totais, teor de humidade, sólidos voláteis, matéria orgânica, carbono orgânico, carbono total e azoto total, determinação da massa volúmica, pH, condutividade elétrica, granulometria, temperatura e teor de oxigénio), e avaliação do grau de maturação/estabilidade (teste de auto-aquecimento). Neste âmbito, foram implementados novos protocolos no laboratório da ERSUC e melhorados alguns dos já existentes, respeitantes a análises aplicáveis ao objetivo deste trabalho. Os dados obtidos relativos ao composto em estudo foram comparados com o Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho, que estabelece regras relativas à colocação no mercado dos adubos e corretivos agrícolas, genericamente designados como matérias fertilizantes.

Verificou-se que a altura ótima nos túneis reatores é de 2,00 m. Se as alturas forem inferiores a 2,00 m o tempo de permanência em túnel será maior. Para um rácio entre o material estruturante e os sólidos de centrífuga menor, o tempo de permanência em túnel é maior. Contudo, deveria também ser estudada nas mesmas condições uma gama de alturas entre os 2,00 m (exclusive) e os 2,50 m, de forma a abranger a gama de alturas ótimas recomendadas para o túnel reator.

As análises ao composto indicam que este preenche os requisitos legais para o tipo de fertilizante a que pertence, corretivo orgânico. Assim sendo, conclui-se que a compostagem no CITVRSU de Coimbra é uma boa forma de valorização de RUB, diminuindo ainda a deposição de resíduos valorizáveis em aterro sanitário.

Palavras – chave: Sólidos de centrífuga; altura de pilha, compostagem em túnel; composto; resíduos urbanos, TMB

Abstract

This work was carried out at the premises of the Integrated Center for Treatment and Solid Waste Recovery (CITVRSU) of Coimbra of ERSUC – Resíduos Sólidos do Centro, SA, specifically in the mechanical and biological treatment plant (MBT). It aimed to optimize the variable height in compost piles in closed tunnels in order to minimize the residence time in the tunnel.

The biomass used for building up the piles is industrially designated as “centrifuge solids”. Centrifuge solids came from the anaerobic digestion of biodegradable municipal waste, obtained from unsorted collection in the Central region, specifically in the geographic area of CITVRSU of Coimbra. The height optimization in compost heaps in the reactor tunnel was studied using four tests (one replica each), in which the pile height (1,50, 1,80 and 2,00 m) and the ratio structural materials/centrifugal solids varied. During the assay was monitored tunnel composting process with respect to temperature and concentration / oxygen content (O₂) and venting via the *SCADA software*, in order to control major variables.

To monitor the composting process physical-chemical analysis were carried out to the centrifuged solids and composted material (total solids, moisture content, volatile solids, organic matter, organic carbon, total carbon and total nitrogen, density, pH, electrical conductivity, particle size, temperature and oxygen content). The degree of maturation/stability (self-heating test) of composted material was also assessed. Furthermore, existing protocols at the laboratory of ERSUC were improved and new protocols were developed.

The data obtained for the test compound were compared with the Portuguese law (Decreto-Lei n. ° 103/2015 de 15 de Junho), laying down the rules on the marketing of agricultural fertilizers and correctives, generally designated as fertilizer materials.

It was found that the optimum height in reactor tunnels is 2,00 m. If the height is less than two meters, the duration of the in-tunnel composting process is longer. When the ratio between structural materials and centrifugal solids is lower, in-tunnel composting process is also longer. However, a range of heights between 2,00 m (inclusive) and 2,50 m should be studied under the same conditions in order to cover the range of optimal heights recommended for the reactor tunnel.

The results of the analyses of the compost indicate that it fulfills the legal requirements for the type of fertilizer it belongs to, organic. Therefore, it is concluded that composting CITVRSU in Coimbra is a good way to valorize biodegradable municipal waste, decreasing its deposition in landfill.

Key - words: Centrifugal solids; pile height, in-tunnel composting; compost, biodegradable municipal waste, MBT

Índice

Agradecimentos	i
Resumo.....	iii
<i>Abstract</i>	v
1. Introdução.....	1
1.1. Conceitos gerais	1
1.2. Âmbito e objetivos	2
1.3. Organização da Dissertação	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Perspetiva Histórica.....	5
2.2. Enquadramento legal Europeu e Nacional.....	6
2.3. Resíduos urbanos	8
2.3.1. Metodologia de caracterização de resíduos urbanos	9
2.3.2. Caracterização física dos resíduos urbanos produzidos em Portugal Continental .	11
2.4. Tipos de recolha de resíduos urbanos.....	12
2.4.1. Recolha indiferenciada	12
2.4.2. Recolha seletiva.....	13
2.4.2.1. Recolha seletiva da fração orgânica	14
2.5. Encaminhamento dos resíduos urbanos	14
2.5.1. Impactes ambientais da deposição de resíduos urbanos em aterro sanitário	15
2.5.2. Valorização orgânica	17
2.5.2.1. Digestão anaeróbia.....	18
2.5.2.2. Compostagem: objetivos e quantitativos do composto produzido em Portugal	19
2.6. Compostagem	20
2.6.1. Tecnologias de compostagem.....	22
2.6.2. Detalhes do sistema reator: em túnel de compostagem.....	25
2.6.2.1. Alturas recomendadas para a pilha de compostagem em túnel reator	25
2.6.2.2. Duração do processo de compostagem em túnel reator	27
2.6.3. Fatores que interferem no processo de compostagem	27
2.6.4. Avaliação da estabilidade/maturação do composto.....	38
2.7. Composto	39
2.7.1. Qualidade do composto	40
2.7.2. Requisitos legais	41
3. Metodologia.....	47

3.1.	Funcionamento da unidade de TMB	49
3.1.1.	Matéria-prima: entrada de resíduos	49
3.1.2.	Pré-seleção dos resíduos urbanos.....	50
3.1.3.	Tratamento da matéria orgânica	51
3.1.3.1.	Separação e armazenamento da suspensão	52
3.1.4.	Digestão da matéria orgânica	53
3.1.5.	Túneis de compostagem	54
3.1.6.	Compostagem em túnel (pré-compostagem)	56
3.1.7.	Maturação e afinação.....	57
3.1.8.	SCADA.....	61
3.2.	Procedimentos experimentais	62
3.2.1.	Ensaio experimentais em túnel – “receitas”	62
3.2.2.	Metodologia do trabalho desenvolvido	65
3.2.3.	Análises físico-químicas.....	67
3.2.4.	Avaliação da estabilidade/maturação.....	76
3.3.	Apresentação e análise dos resultados	77
4.	Resultados e Discussão	79
4.1.	Caracterização da matéria-prima para compostagem.....	79
4.1.1.	Caracterização da entrada de <i>pulper</i>	79
4.1.2.	Análise dos sólidos de centrífuga	80
4.2.	Agente de <i>bulking</i>	81
4.3.	Compostagem em túnel: otimização de variáveis	83
4.3.1.	Entrada de túnel.....	84
4.3.2.	Em túnel	85
4.3.3.	Saída de túnel.....	90
4.3.4.	Altura ótima da pilha de compostagem em túnel	92
4.4.	Composto maturado	93
4.5.	Grau de maturação: Teste de <i>Rottegrad</i>	94
4.6.	Composto afinado	95
4.6.1.	Comparação dos resultados obtidos com o documento legal.....	96
4.7.	Considerações finais do processo de compostagem.....	98
4.8.	Sugestões do autor.....	99
5.	Conclusão	101
6.	Referências Bibliográficas	105
7.	Anexos.....	109

Anexo A: Métodos de referência de amostragem e de análise a efetuar a corretivos orgânicos	109
Anexo B: Composto FERTISUC.....	112
8. Apêndices	115
Apêndice A: Grupo EGF, S.A.	115
Apêndice B: Protocolo Laboratorial: Determinação do pH e da condutividade elétrica ..	117
Apêndice C: Protocolo Laboratorial: Caracterização granulométrica	119
Apêndice D: Teste de <i>Rottegrad</i> : acerto do teor de humidade com águas	120
Apêndice E: Caracterização da entrada de <i>pulper</i>	121
Apêndice F: Análise dos sólidos de centrífuga	124
Apêndice G: Agente de <i>bulking</i>	126
Apêndice H: Entrada de Túnel	127
Apêndice I: Em túnel - monitorização do túnel no <i>SCADA</i>	130
Apêndice J: Em túnel - análise dos dados fornecidos pelo <i>SCADA</i> por ensaio para a fase Compostagem e para uma análise geral	133
Apêndice K: Saída de túnel	135
Apêndice L: Composto maturado.....	137
Apêndice M: Grau de Maturação - Teste de <i>Rottegrad</i>	138
Apêndice N: Composto afinado.....	139
Apêndice O: Análises externas realizadas ao composto final	140
Apêndice P: Sugestão de uma brochura de compostagem.....	143

Índice de Equações

Equação 1: Percentagem de cada fração da caracterização (em que: % Fração (F_i) - fração de constituinte da caracterização expressa em %; M_{Fi} - massa de cada uma das frações, em g; M_{total} = massa da amostra total, em g).	68
Equação 2: Cálculo dos sólidos totais (em que: ST (%) - sólidos totais expressos em %; P_0 - massa do cadinho, em g; P_1 - massa do cadinho + amostra fresca, em g; P_2 - massa do cadinho + amostras seca, em g).	69
Equação 3: Cálculo do teor de humidade (em que: TH - teor de humidade expresso em %; ST - sólidos totais, em %).	69
Equação 4: Cálculo dos sólidos voláteis (em que: SV (%) - sólidos voláteis expressos em %; P_0 - massa do cadinho (g); P_1 - massa do cadinho + amostra fresca (g); P_2 - massa do cadinho + amostras seca (g); P_3 - massa do cadinho + amostra calcinada (g)).	70
Equação 5: Cálculo da matéria orgânica (em que: MO (%) - matéria orgânica expressa em % m.s.; ST - sólidos totais, em %; SV - sólidos voláteis, em %).	70
Equação 6: Determinação do teor de azoto a 75° C (em que: N (%) - teor de azoto expresso em %; [HCL] - normalidade da solução de ácido clorídrico; $V_{amostra}$ - volume de HCL gasto na titulação da amostra, em ml; V_{branco} - volume de HCL gasto na titulação do branco, em ml; $m_{amostra}$ - massa da amostra seca a 65°C, em g; 0,014 - valor (g) de N que reage com 1 ml de HCL 1 mol dm ⁻³).	72
Equação 7: Determinação do teor de azoto em percentagem de massa seca (em que: N (% m.s.) - teor de azoto expresso em % m/m _{seca} ; $N_{75^{\circ}C}$ - teor de azoto calculado na equação 6; TH – teor de humidade (%)).	73
Equação 8: Relação C/N.	73
Equação 9: Determinação da massa volúmica da amostra (em que: ρ - massa volúmica da amostra expressa em g/L; P_1 - volume da massa do gobelé com água, em L; P_2 - massa do gobelé com amostra, em g).	74
Equação 10: Acerto do teor de humidade a 35% com água (em que: Hr do composto - humidade real do composto)	120

Índice de Figuras

Figura 1: Resultados da caracterização física média dos RU produzidos no Continente, em 2013, elaborada com base nas especificações técnicas da Portaria n.º 851/2009, de 7 de agosto.	11
Figura 2: Destino direto dos resíduos urbanos (V. material - valorização material; TM - tratamento mecânico; Inc - incineração; VO - valorização orgânica; TMB - tratamento mecânico e biológico; aterro).	15
Figura 3: Perfil de típico de temperatura numa pilha aeróbia.	31
Figura 4: Municípios abrangidos pela ERSUC – Litoral Centro.....	48
Figura 5: ERSUC, CITVRSU-Coimbra, Vil de Matos.	49
Figura 6: Zona de descarga de resíduos (RU, REU, RUB).	50
Figura 7: Diagrama de Blocos do Tratamento Mecânico.....	51
Figura 8: Túneis de compostagem (1 - túneis de compostagem; 2 - ventilador; 3 - lajes de cimento perfuradas, com 8 aberturas cada).....	54
Figura 9: Preparação da mistura (rácio estruturante: sólidos de centrífuga), (1 - tolva de lamas e sem-fins helicoidais que transporta os sólidos de centrífuga para a plataforma misturadora; 2 - plataforma misturadora; 3 - tapete de material estruturante; 4 - material estruturante (estilha de acácia); 5 e 6 substrato orgânico preparado).	55
Figura 10: Composto maturado (1 - pilha de compostagem trapezoide; 2 - pilha revolvida pela volteadora de composto; 3 - composto maturado para seguir para afinação).....	58
Figura 11: Sistema de Afinação (1 - panorama do sistema de afinação; 2 - pá carregadora carrega o material no alimentador de composto; 3 - tapete que transporta o material para o crivo de malha elástica; 4 - tapete que transporta o material já sem o estruturante para uma mesa densimétrica; 5 - saída de refugo; 6 – hidroclone).	59
Figura 12: Resultado do sistema de afinação (1 - estruturante recirculado; 2 - refugo; 3 - composto final).	60
Figura 13: Composto afinado (1 - composto final após afinação; 2 - armazenamento do composto final (em stock)).	60
Figura 14: Diagrama de Blocos do Tratamento Biológico.....	61
Figura 15: Visualização dos túneis de compostagem através do software SCADA.	62
Figura 16: Ensaios em túnel de compostagem, com receitas diferentes (1 - receita A; 2 - receita B; 3 - receita C; 4 - receita D).	64
Figura 17: Caracterização física da matéria orgânica à entrada de pulper (1 - saco de transporte da amostra para o laboratório; 2 - amostra a caracterizar; 3 - peneiro de malha 20 mm; 4 - fração <20 mm; 5 - madeira; 6 - metal; 7 - orgânico de cozinha; 8 - orgânico indiferenciado; 9 - orgânico de jardim; 10 - outros; 11 - papel; 12 - vidro e pedra). ..	68
Figura 18: Determinação do carbono orgânico (1 - moenda e a crivagem com crivo de 500 µm; 2 - recipiente que recolhe a amostra moída e crivada; 3 - analisador LECO® (forno) 4 - barquinhas de combustão, com amostra, cobertas com óxido de alumínio);5 - software associado ao analisador LECO®.....	71
Figura 19: Determinação do azoto total (1 - tubos de Kjeldahl; 2 - sistema de digestão;3 - solução de ácido bórico a 2%; 4 - tubos de Kjeldahl com amostra digerida; 5 - unidade de destilação; 6 - erlenmeyer contendo 20 ml de solução de ácido bórico a 2%; 7 - erlenmeyer com a amostra destilada; 8 - amostra destilada).....	73
Figura 20: Determinação de frações por granulometria (1 - amostra a ser tratada; 2 e 3 crivo de malha 20 mm e 10 mm, respetivamente; 4 - preparação da bancada de trabalho; 5, 6	

e 7 fração de fração <10 mm; 10 mm <fração <20 mm e fração> 20 mm, respetivamente).	75
Figura 21: Determinação do Teste de <i>Rottegrad</i> em vaso de Dewar.....	76
Figura 22: Caracterização pontual do estruturante novo.....	82
Figura 23: Caracterização média do estruturante recirculado.	82
Figura 24: Ensaio 2 - abertura do túnel, durante a compostagem em túnel, para compor as sondas de temperatura e oxigénio (1 - pilha de compostagem com uma altura inicial de 1,50 m (rácio 2:1); 2 - sondas de temperatura e oxigénio colocadas corretamente, notando-se já ligeiro abatimento da pilha de compostagem).	90
Figura 25: Ensaio 2- altura inicial e final na pilha de compostagem (1 - pilha de compostagem com uma altura inicial de 1,50 m (rácio 2:1); 2 - pilha de compostagem com uma altura final de 1,26 a 1,30 m ao longo da pilha).....	91
Figura 26: Pilhas de composto afinado em stock para venda.	96
Figura 27: Composto FERTISUC (página1/3).	112
Figura 28: Composto FERTISUC (página 2/3).	113
Figura 29: Composto FERTISUC (página 3/3).	114
Figura 30: Cadeira de valor do Grupo EGF, S.A.....	116
Figura 31: Protocolo Laboratorial: Determinação do pH e da condutividade elétrica (página 1/2)	117
Figura 32: Protocolo Laboratorial: Determinação do pH e da condutividade elétrica (página 2/2).	118
Figura 33: Protocolo Laboratorial: Determinação do pH e da condutividade elétrica.	119
Figura 34: Sugestão de brochura de compostagem (página 1/2).	144
Figura 35: Sugestão de brochura de compostagem (página 2/2).	145

Índice de Tabelas

Tabela 1: Quantitativos de composto produzido (t).....	20
Tabela 2: Alturas aconselhadas para os processos de compostagem.	26
Tabela 3: Letalidade de alguns microrganismos patogénicos.	29
Tabela 4: Teores de humidade inicial e final no processo de compostagem, por vários autores.	34
Tabela 5: Tipos de matérias fertilizantes não harmonizadas: Grupo 5- Corretivos orgânicos...	42
Tabela 6: Utilização da matéria fertilizante de acordo com a classe.....	43
Tabela 7: Requisitos aplicáveis às matérias fertilizantes obtidas a partir de resíduos.....	45
Tabela 8: Categorias de matéria fertilizante em função do grau de maturação.....	46
Tabela 9: Ensaio Experimentais: Receitas (Rácio E:SC (rácio estruturante: sólidos de centrífuga); altura da pilha (m)).	62
Tabela 10: Calendarização das análises efetuadas.	66
Tabela 11: Frações da caracterização e respetivos constituintes.....	67
Tabela 12: Grau de maturação do composto de acordo com a temperatura máxima atingida durante o ensaio de auto-aquecimento.	77
Tabela 13: Caracterização, média, à entrada de pulper por categorias.	79
Tabela 14: Valores médios da fração total da entrada de pulper (ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica).....	80
Tabela 15: Valores médios dos sólidos de centrífuga (ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; C _t - carbono total; C _{org} - carbono orgânico; N _t - azoto total; Relação C/N - relação C _{org} / N _t ; ρ - massa volúmica).	81
Tabela 16: Comparação do teor de humidade do estruturante (TH - teor de humidade).....	83
Tabela 17: Valores médios das análises realizadas à entrada de túnel (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; CE - condutividade elétrica).	84
Tabela 18: Valores médios das análises realizadas à entrada de túnel (continuação) (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga; C _t - carbono total; C _{org} - carbono orgânico; N _t - azoto total; Relação C/N - relação C _{org} / N _t).	85
Tabela 19: Resultados da monitorização dos túneis de compostagem pelo software SCADA para a fase de esterilização (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga).....	86
Tabela 20: Tipo de compostagem associada à temperatura de esterilização/higienização em túnel (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga).....	88
Tabela 21: Média dos dias de compostagem na fase de esterilização (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga).....	89
Tabela 22: Valores médios das análises realizadas à saída de túnel (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; CE - condutividade elétrica).	92
Tabela 23: Valores médios do composto maturado (ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; C _t - carbono total; C _{org} - carbono orgânico; N _t - azoto total; Relação C/N - relação C _{org} / N _t).	93
Tabela 24: Valor médio do grau de maturação - Teste de <i>Rottegrad</i> (nível V - composto maturado).	94

Tabela 25: Valores médios do composto afinado (ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; CE - condutividade elétrica).....	95
Tabela 26: Comparação dos resultados obtidos para o composto afinado com o Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho e com o Composto FERTISUC (TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; CE - condutividade elétrica).....	97
Tabela 27: Métodos de referência a adotar na determinação dos valores característicos das matérias fertilizantes do Grupo 5.....	109
Tabela 28: Caracterização da entrada de pulper (CEP - caracterização à entrada de pulper) .	121
Tabela 29: Análise das frações da caracterização de entrada de pulper (CEP - caracterização à entrada de pulper; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica).....	123
Tabela 30: Análise dos sólidos de centrifuga (SC - sólidos de centrifuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; Relação C/N - relação C_{org}/N_t).....	124
Tabela 31: Caracterização granulométrica do estruturante recirculado (ER - estruturante recirculado; ρ - massa volúmica).....	126
Tabela 32: Comparação do teor de humidade do estruturante (ST - sólidos totais; TH - teor de humidade).....	126
Tabela 33: Entrada de túnel (I - início da pilha; M - meio da pilha; F - fim da pilha; Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrifuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; T - temperatura; CE - condutividade elétrica).....	127
Tabela 34: Entrada de túnel (continuação) (I - início da pilha; M - meio da pilha; F - fim da pilha; Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrifuga; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; C/N - relação C_{org}/N_t).....	129
Tabela 35: Visualização de um túnel de compostagem no software SCADA.....	131
Tabela 36: Análise dos dados obtidos pelo SCADA na fase de compostagem (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrifuga).....	133
Tabela 37: Análise geral dos dados obtidos pelo SCADA durante as fases de esterilização/higienização e compostagem.....	134
Tabela 38: Saída de túnel (I - início da pilha; M - meio da pilha; F - fim da pilha; Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrifuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; T - temperatura; CE - condutividade elétrica).....	135
Tabela 39: Composto maturado (CM - composto maturado; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; Relação C/N - relação C_{org}/N_t).....	137
Tabela 40: Grau de maturação (CMR - composto maturado <i>Rottegrad</i> ; ST - sólidos totais; TH - teor de humidade; T - temperatura; nível V e IV - composto maduro).....	138
Tabela 41: Composto afinado (CA - composto afincado; ST- sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; T - temperatura; CE - condutividade elétrica).....	139
Tabela 42: Análises externas realizadas ao composto final.....	140

Lista de Siglas

APA, I.P.	Agência Portuguesa do Ambiente, Instituto Público
b.t.q.	Base tal qual
C	Carbono
CA	Composto Afinado
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CE	Condutividade Elétrica
CEP	Caracterização à Entrada de <i>Pulper</i>
CH₄	Metano
CITVRSU	Centro Integrado de Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos
CM	Composto Maturado
CMR	Composto Maturado <i>Rottegrad</i>
CO₂	Dióxido de Carbono
C_{org}	Carbono orgânico
C_t	Carbono total
DGQA	Direção Geral da Qualidade e do ambiente
e.g.	<i>Exempli gratia</i> , “por exemplo”
ECAL	Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos
EGF, S.A.	Empresa Geral de Fomento, Sociedade Anónima
EN	Norma Europeia
ENRRUBDA	Estratégia Nacional para a Redução de Resíduos Urbanos Biodegradáveis Destinados aos Aterros
ER	Estruturante Recirculado
ERSUC, S.A.	Resíduos Sólidos do Centro, Sociedade Anónima
ESAC	Escola Superior Agrária de Coimbra
et al.	<i>Et alia</i> , “e outros”
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
GEE	Gases de Efeito de Estufa
HMI	Human Machine Interaction (Interface Homem-Máquina)
i.e.	<i>Id est</i> , “isto é, ou seja”
IPAC	Instituto Português de Acreditação
LER	Lista Europeia de Resíduos
m.s.	Matéria seca

MAOTDR	Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional
MGA	Mestrado em Gestão Ambiental
MIRR	Mapa Integrado de Registo de Resíduos
MO	Matéria Orgânica
MRRU	Mapa de Registo de Resíduos Urbanos
MTD's	Melhores Técnicas Disponíveis
N	Azoto
NMP	Número Mais Provável
N_t	Azoto total
O₂	Oxigénio molecular
PE	Polietileno
PERSU	Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos
PET	Politereftalato de Etileno
PVC	Policloreto de Vinilo
Rácio E:SC	Rácio Estruturante: Sólidos de Centrífuga
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
REU	Resíduos Equiparados a Urbanos
rpm	Rotações por minuto
RSR	Resíduos Sólidos Residuais
RU	Resíduos Urbanos
RUB	Resíduos Urbanos Biodegradáveis
SC	Sólidos de Centrífuga
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> (Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados)
SIRAPA	Sistema Integrado de Resíduos da Agência Portuguesa do Ambiente
SMTVRSU do Litoral Centro	Sistema Multimunicipal de Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos do Litoral Centro
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TH	Teor de Humidade
TM	Tratamento Mecânico
TMB	Tratamento Mecânico e Biológico
VMA	Valor Máximo Admissível
VO	Valorização Orgânica

Lista de Símbolos

\approx	Aproximadamente igual
\varnothing	Diâmetro
ρ	Massa volúmica (“ró”)

Lista de Unidades de Medida

g	Grama: unidade de massa
°C	Grau Celsius: unidade de temperatura
L	Litro: unidade de volume
mbar	Milibar: unidade de pressão
m	Metro: unidade de comprimento
m³	Metro cúbico: unidade de volume
ms.cm⁻¹	Milisiemen por centímetro: unidade de condutividade elétrica
ml	Mililitro: unidade de volume
mm	Milímetro: unidade de comprimento
%	Porcentagem: unidade percentual
kg	Quilograma: unidade de massa
s	Segundo: unidade de intervalo de tempo
t	Toneladas: unidade de massa

1. Introdução

1.1. Conceitos gerais

A produção de resíduos tem aumentado significativamente ao longo dos anos, com maior relevância nas últimas duas décadas. Este aumento deveu-se à densificação das cidades devido ao abandono das áreas rurais, ao aumento de bens de consumo embalados, e a um consumismo crescente das populações (Levy & Cabeças, 2006). Perante estes motivos a gestão de resíduos começou a ser uma prioridade nas sociedades atuais, visto que estes são uma fonte de poluição e podem causar problemas de saúde, havendo a necessidade de salvaguardar e promover a sua utilização sustentável.

Segundo Russo (2003), resíduos urbanos (RU) *“são os resíduos sólidos domésticos, públicos, comerciais, nomeadamente os resíduos provenientes de estabelecimentos comerciais e do sector de serviços, e outros resíduos que, pela sua natureza ou composição, sejam semelhantes aos resíduos domésticos”*. Estes resíduos sem utilização, ou indesejáveis pelo seu detentor, possuem no entanto capacidades de valorização que devem ser aproveitadas (Russo, 2003). De acordo com a Comissão Europeia os resíduos, *“se forem bem geridos, podem ser uma fonte valiosa de materiais, principalmente numa altura em que estes começam a escassear”*. A sua gestão compreende uma parte significativa do crescimento económico, através da criação de emprego, dando ao resíduo um final adequado (Comissão Europeia, 2015).

Atualmente, a gestão de RU compreende diversos pilares fundamentais que constituem uma política integrada caracterizada pela adoção de sistemas integrados, baseada na redução na fonte, na reutilização de resíduos, na reciclagem, na transformação dos resíduos e na deposição em aterros sanitários (Russo, 2003). A transformação de resíduos através da valorização orgânica (VO) permite a obtenção de um composto com características de húmus que pode ser utilizado para enriquecer os solos, equiparando-se e substituindo os fertilizantes químicos (Levy & Cabeças, 2006).

Em Portugal, atualmente, cerca de 52,6% dos resíduos são resíduos urbanos biodegradáveis (RUB). Este valor corresponde ao somatório das categorias bio-resíduos, resíduos verdes (recolhidos em separado) e papel/cartão incluindo Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos (ECAL), conforme os pressupostos adotados para monitorização do cumprimento da Diretiva Aterros (Silva *et al.*, 2014).

A VO é uma opção viável que vai ao encontro da prioridade em termos de política comunitária de RU decorrente da nova Diretiva Aterros, que obriga à redução gradual da quantidade de

matéria orgânica (MO) fermentável em aterro sanitário (Levy & Cabeças, 2006). A valorização orgânica de RUB pode processar-se por digestão anaeróbia, por compostagem ou por ambos. Na digestão anaeróbia, a fermentação efetua-se sem a presença de oxigénio (O_2). Na compostagem, pelo contrário, a decomposição dos produtos biodegradáveis é realizada na presença de O_2 . Em ambos os processos, os produtos resultantes são sujeitos a um pós-tratamento por maturação, podendo ainda seguir-se no final, uma afinação (Levy & Cabeças, 2006).

Nos Centros Integrados de Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos (CITVRSU) a VO de RUB provenientes de recolha indiferenciada, após triagem, é normalmente efetuada por ambos os processos já referidos. Ou seja, as lamas provenientes dos digestores, após digestão anaeróbia (da qual resulta o biogás), são desidratadas e devido ao seu potencial de matéria orgânica são compostadas. As lamas, designadas industrialmente por sólidos de centrífuga (SC), são misturadas ou não com estruturante (estilha e casca de madeira, entre outros), e passam a uma fase aeróbia, que é dividida em duas operações distintas: compostagem fechada em túneis reatores e pós-compostagem aberta ou maturação, seguida de afinação da qual resulta o composto final.

A valorização de RUB nos CITVRSU, para além da produção de biogás e de composto reduz significativamente a quantidade de resíduos que são conduzidos a destino final, evitando a deposição direta em aterro sanitário.

1.2. Âmbito e objetivos

A Estratégia Nacional para a Redução de Resíduos Urbanos Biodegradáveis Destinados aos Aterros (ENRRUBDA) passa pela valorização orgânica dos RUB, com custos acessíveis. Nesta perspetiva, a compostagem constitui a solução apropriada por permitir redução de custos com a deposição em aterro sanitário, bem como pelo facto de produzir um corretivo orgânico com valor para a utilização em solos com baixo teor de matéria orgânica e nutrientes. Contudo, nos CITVRSU o biogás gera um benefício superior ao do composto. Neste sentido, a compostagem surge como forma de valorização dos sólidos centrifugados, ou seja, as lamas provenientes da digestão anaeróbia. Aos sólidos de centrífuga é adicionado estruturante (estilha de madeira), para reduzir o teor de humidade (TH) e promover a porosidade. A mistura resultante destes materiais segue para compostagem em túnel reator, seguida da maturação e por fim a afinação, da qual resulta o composto afinado.

À semelhança com o que se pretende em todos os setores, também na compostagem o objetivo primordial é otimizar o processo, especificamente no túnel reator de modo a reduzir meios e recursos utilizados. Neste âmbito, os objetivos deste trabalho enquadram-se na necessidade específica identificada e são os seguintes:

- ◆ Otimização da variável altura nas pilhas de compostagem em túnel reator, variando a altura da pilha e o rácio entre o material estruturante e os sólidos de centrífuga;
- ◆ Acompanhar do processo de compostagem, realizando análises físico-químicas e análise do grau de estabilidade/maturação;
- ◆ Implementação de protocolos laboratoriais para execução no laboratório do CITVRSU de Coimbra e melhorar alguns dos já existentes, respeitantes a análises aplicáveis ao objetivo deste trabalho;
- ◆ Comparação dos resultados obtidos com a legislação existente.

Este trabalho enquadra-se no âmbito do estágio profissionalizante do Mestrado em Gestão Ambiental (MGA), da Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC) em parceria com a ERSUC - Resíduos Sólidos do Centro, S.A.. O presente estágio foi realizado nas instalações do CITVRSU de Coimbra.

1.3. Organização da Dissertação

Com o intuito de dar cumprimento aos objetivos descritos anteriormente, esta dissertação encontra-se estruturada em 6 capítulos principais:

Capítulo 1 - Introdução: neste primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema em discussão e são apresentados os objetivos do trabalho e a organização da dissertação.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: este capítulo é dedicado à temática abordada, nomeadamente com o levantamento da principal legislação nacional e comunitária relativa à temática dos resíduos, composição física e metodologia de caracterização dos resíduos, descrição dos sistemas de recolha indiferenciada e seletiva da fração orgânica de RU, impactes ambientais da deposição de resíduos urbanos em aterro e valorização orgânica. A valorização orgânica vai focar-se na análise temática da compostagem.

Capítulo 3 - Neste capítulo é apresentada a empresa acolhedora, a proveniência dos resíduos urbanos e o funcionamento da unidade TMB. Neste capítulo são também apresentados os procedimentos experimentais bem como a metodologia de trabalho desenvolvida.

Capítulo 4 - Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da metodologia usada no estudo de caso e algumas recomendações/sugestões para estudos futuros.

Capítulo 5 - Neste capítulo é apresentada a conclusão ao trabalho desenvolvido.

São apresentadas, no final deste trabalho, as fontes bibliográficas consultadas que serviram de suporte teórico e metodológico para este trabalhos, os anexos e os apêndices.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Perspetiva Histórica

Nos primórdios da civilização a deposição de resíduos não era problemática, uma vez que a população era reduzida e a superfície territorial para a deposição e regeneração destes era mais do que suficiente (Levy & Cabeças, 2006). Os resíduos vegetais e os dejetos de animais eram utilizados como forma de correção orgânica dos solos, sendo este o principal método tradicional para restaurar o balanço de nutrientes no solo, e existe desde que os solos começaram a ser trabalhados para a produção vegetal. Pelo que, a compostagem como método de reciclagem do lixo doméstico, para obtenção de fertilizante orgânico, é conhecida pelos agricultores desde longa data (Brito, 2005).

Na Europa, durante o século XVIII e XIX, os agricultores transportavam os seus produtos para as cidades em crescimento e, em permuta, traziam para as suas terras a fração orgânica dos RU das cidades para utilizá-la como corretivo orgânico do solo. Assim, esses resíduos eram quase totalmente reciclados através da agricultura para sustentar a produção vegetal. Até meados do século XX os resíduos não colocaram grandes problemas em termos de destino final, mas a expansão das áreas urbanas e o aumento populacional conduziu a que os métodos usados como destino dos RU se tornassem rapidamente inadequados (Brito, 2005).

O conceito de compostagem municipal em grande escala pensa-se que tenha surgido na Holanda em 1929 com a criação de uma empresa de gestão de resíduos pelo governo holandês, a “Vuil Afvoer Maatschappij”. Esta empresa, consistia numa central onde era descartado o lixo proveniente de várias cidades com o intuito de produzir composto para aplicação no solo, de forma a colmatar as suas carências e a melhorá-lo (Slater & Frederickson, 2001). No entanto, o primeiro teste piloto em grande escala para a prática de compostagem como tratamento dos RU indiferenciados começou na Europa na década de 1970 e estendeu-se à década de 1980, altura em que se esperava que estas centrais tratassem cerca de 35% do total de RU (Slater & Frederickson, 2001). Estas centrais foram planeadas para tentar processar todas as fileiras (tipologias) de resíduos como são conhecidas as atuais unidades de TMB. O elemento-chave do processo de TMB envolvia a separação mecânica da fração orgânica dos RU antes da compostagem. As centrais também se comprometiam a fazer reciclagem, ainda que limitada, de alguns materiais a partir de RU, tais como plásticos e metais ferrosos, sendo alguma da fração leve utilizada para a produção de um combustível derivado de resíduos (CDR) (Slater & Frederickson, 2001).

Desde a década de 1990 até aos nossos dias, normas de poluição do ar cada vez mais rigorosas, a diminuição da disponibilidade de aterros sanitários, a pressão exercida para a utilização de métodos com menor impacto ambiental, entre outros fatores, conduzem a um interesse no processo de compostagem para a valorização dos RUB.

2.2. Enquadramento legal Europeu e Nacional

Os resíduos e a sua gestão continuam a ser um problema a que as sociedades contemporâneas tem de fazer face. Mas, hoje os resíduos devem ser vistos também como um recurso. Posto isto, ao longo dos últimos anos, têm vindo a ser elaboradas e postas em vigor leis específicas, que os países ou municípios se comprometem a cumprir, com o objetivo de implementar boas práticas ambientais no que se refere à gestão dos resíduos orgânicos e embalagens, visando a sua redução, valorização e reciclagem, tendo em conta a aplicação de incentivos económicos e a criação de circuitos específicos de recolha de bio-resíduos. Estes têm como objetivo produzir um composto de alta qualidade passível de ser utilizado na agricultura (Correia, 2007).

Em Portugal, a estratégia de gestão de resíduos urbanos está condicionada pelo cumprimento de objetivos comunitários, nomeadamente, os provindos pela Diretiva Aterro e Diretiva Embalagens, transpostas para a ordem jurídica nacional, como vão ser referidos em seguida, bem como as perspetivas de cumprimento das suas metas.

Tal como como nos restantes países da União Europeia, em Portugal, encontra-se em vigor a Diretiva Europeia 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterros sanitários (Diretiva Aterros), que foi transposta para legislação nacional pelo Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio. Esta Diretiva estabeleceu metas e princípios orientadores que têm as seguintes diretrizes: (i) redução na fonte com a intervenção ao nível dos processos de fabrico e compostagem em pequena escala; (ii) recolha seletiva da matéria orgânica e de papel/cartão “porta-a-porta”, em ecopontos/ecocentros, com pré-tratamento mecânico e a (iii) valorização orgânica - por processos aeróbios (compostagem), processos anaeróbios (digestão anaeróbia) da fração orgânica e com pré-tratamento mecânico (reciclagem). A Diretiva em questão também abrange medidas para reduzir a quantidade de RUB com destino a aterros sanitários, permitindo a redução dos impactes ambientais causados pela sua degradação. Assim, foram definidas as metas relativamente aos RUB admissíveis em aterro sanitário, até 2006, 2009 e 2016 de, respetivamente 75%, 50% e 35% da quantidade total destes resíduos produzidos em relação ao ano de 1995 (Correia, 2007).

Em consequência do cumprimento destas metas, em Julho de 2003, foi aprovada a ENRRUBDA e o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU II) (2007 – 2016), publicado pelo Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional (MAOTDR). Em ambos é realizada uma ponderação sobre a estratégia aplicada para o desvio dos RUB dos aterros, para que sejam cumpridas estritamente as metas previstas (Correia, 2007). Em 2009, surgiu o Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto de 2009, que estabelece o regime jurídico da deposição dos resíduos em aterro sanitário e veio revogar o Decreto-Lei n.º 152/2002. Com este novo decreto-lei existiu a necessidade da revisão da calendarização das metas de desvio de RUB de aterro sanitário (Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto):

- a) Para 2013, os RUB destinados a aterro sanitário devem ser reduzidos para 50% da quantidade total, em peso, dos RUB produzidos em 1995;
- b) Para 2020, os RUB destinados a aterro sanitário devem ser reduzidos para 35% da quantidade total, em peso, dos RUB produzidos em 1995.

O cumprimento destas metas passa por procurar iniciar ou incrementar uma estratégia de recolha seletiva dos RUB, com intuito da sua VO, podendo passar pela aplicação de legislação específica neste domínio (como é o caso dos resíduos de embalagens), a curto prazo. Ao fomentar a recolha seletiva dos RUB, em específico dos bio-resíduos, estará a garantir a promoção de um composto orgânico de alta qualidade (Correia, 2007).

No PERSU II, o Eixo III/Medida 4 - Reforço dos sistemas ao nível de infraestruturas e equipamentos, incide sobre várias linhas de atuação no sentido de cumprir as metas estabelecidas pelas Diretivas Aterros (e Embalagens), destacando-se: *“Reforço da Valorização Orgânica de RUB recolhidos seletivamente”* e *“Implementação do Tratamento Mecânico e Biológico”*. Neste capítulo é ainda destacada uma linha de atuação que vai ao encontro de um protocolo laboratorial realizado no âmbito do conhecimento da matéria-prima utilizada nesta dissertação (quantificação e caracterização física dos RU) que refere a necessidade de estabelecer *“um novo procedimento metodológico para a amostragem e caracterização dos RU, frações indiferenciada e provenientes da recolha seletiva”* (Correia, 2007).

Com aprovação do PERSU II, que define várias medidas importantes para metodologia de caracterização e quantificação dos resíduos urbanos em Portugal, passou a ser possível assegurar a disponibilização de informação estatística necessária para o cumprimento das metas a nível nacional e comunitário. A Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro, salienta ainda a importância de *“aprofundar o conhecimento e caracterização dos resíduos com vista à avaliação do seu potencial de reciclagem, no sentido de*

atingir as metas preconizadas”. Foi neste sentido, aprovada na legislação nacional a Portaria n.º 851/2009, de 7 de Agosto, que *“estabelece as normas técnicas relativas à caracterização de resíduos urbanos, designadamente a identificação e quantificação dos resíduos correspondentes à fração caracterizada como reciclável”*.

2.3. Resíduos urbanos

Os resíduos urbanos possuem uma constituição diversificada, uma vez que podem ser produzidos em qualquer atividade económica, setor doméstico e na sua maioria cafés, restaurantes, lojas de retalho, entre outros (Castanheira *et al.*, 2004). É assim considerado RU *“o resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações”* com uma produção diária inferior a 1100 L e/ou por grandes produtores de resíduos semelhantes com uma produção diária igual ou superior a 1100 L (Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho).

A gestão adequada dos RU requer o conhecimento sistemático e consistente das suas características, quer quantitativas, quer qualitativas, para a determinação do sistema de gestão e do método de tratamento dos mesmos, bem como para a implementação de formas avançadas de valorização dos resíduos, com ênfase para as recolhas seletivas. De forma a conhecer as características específicas de uma determinada massa de RU é necessário proceder à sua caracterização, identificando quais as frações presentes e o peso relativo de cada uma delas. Contudo, a composição física e o peso específico dos RU depende de vários fatores que influenciam a sua diversidade, como sejam (Russo, 2003; Levy & Cabeças, 2006):

- a) As características do aglomerado - composição dos resíduos, que varia consoante o nível de vida das populações e a composição da zona (atividade predominante nessa zona, ou seja, se é uma zona residencial ou de serviços, se é urbana ou rural, ou se é industrial),
- b) Tipo de ocupação dominante na zona de origem e dentro de cada zona, conforme o período do ano (estação do ano, épocas festivas, época de maior atividade para certas indústrias, etc.).

Na composição física típica dos resíduos urbanos (domésticos), os principais tipos de materiais que se encontram são os seguintes (Levy & Cabeças, 2006):

- ◆ Resíduos fermentáveis/putrescíveis, onde se incluem os resíduos orgânicos como os vegetais, os restos de alimentos, frutas, etc.;

- ◆ Papel e cartão constituído por jornais, livros revistas, folhetos, embalagens de papel, embalagens de cartão e compósitos, entre outros;
- ◆ Plásticos onde estão incluídas garrafas e frascos em Polietileno (PE), Policloreto de vinilo (PVC), o Politereftalato de etileno (PET), filme plástico, outros tipos de embalagem e outros tipos de plásticos que não embalagens;
- ◆ Vidro, que se pode dividir em vidro de embalagens e de não embalagens;
- ◆ Metais ferrosos e não ferrosos podem-se salientar, dentro de cada tipo, as embalagens e não embalagens;
- ◆ Têxteis sanitários, onde se incluem as fraldas descartáveis, algodão, etc.;
- ◆ Têxteis, onde se salientam as roupas e similares utilizados no quotidiano;
- ◆ Madeira – madeira embalagem e madeira não embalagem para outros fins;
- ◆ Combustíveis não especificados;
- ◆ Incombustíveis não especificados, tal como porcelanas de embalagens e para outros fins;
- ◆ Resíduos domésticos especiais (embalagens, pilhas, e acumuladores e outros resíduos domésticos especiais);
- ◆ Finos, onde estão incluídos todos os resíduos com menos de 20 mm.

Para além da produção e composição, os resíduos urbanos são também caracterizados através de outros parâmetros dos quais se salientam (Levy & Cabeças, 2006):

- a) Peso específico (massa volúmica);
- b) Teor de humidade;
- c) Poder calorífico;
- d) Relação carbono/azoto;
- e) Sólidos voláteis (SV);
- f) Composição química.

2.3.1. Metodologia de caracterização de resíduos urbanos

Uma campanha de caracterização de resíduos sólidos tem como objetivo estimar os valores médios de massa volúmica (ρ) e da composição física dos resíduos recolhidos, que são dados essenciais para o estudo do processo de tratamento e destino final dos mesmos. A determinação da composição física dos RU faz-se com base na separação dos diversos componentes,

nomeadamente: vidro, papel e cartão, materiais plásticos, metais ferrosos e não ferrosos, têxteis, materiais fermentáveis e finos (resíduos de dimensões inferiores a 20 mm) (Russo, 2003).

Um processo de caracterização difere de situação para situação, dos objetivos pretendidos, depende das soluções de tratamento utilizadas e do enquadramento legal em vigor. Assim sendo, para o planeamento de uma campanha de quantificação e caracterização de RU deve-se definir (Levy & Cabeças, 2006):

- ◆ Uma zona de estudo;
- ◆ Um método de recolha de amostras de forma a garantir a representatividade dos resultados;
- ◆ Número de amostras a recolher;
- ◆ Uma calendarização para a campanha (datas e horas de recolha das amostras);
- ◆ Os parâmetros a determinar;
- ◆ E os recursos necessários (humanos, materiais e financeiros).

A caracterização física dos RU proposta pela Portaria n.º 768/88, de 30 de Novembro existe, em Portugal, desde 1989, com a introdução da metodologia da Direção Geral da Qualidade do Ambiente (DGQA). Esta metodologia foi estabelecida para campanhas de quantificação e caracterização de resíduos urbanos a implementar pelos municípios, com o intuito de obter dados uniformizados para preenchimento do Mapa de Registo de Resíduos Urbanos (MRRU), atualmente designado de Mapa Integrado de Registo de Resíduos (MIRR). A metodologia referida assenta num processo de amostragem fundamentada na tipologia dos circuitos de recolha realizados pelos municípios, o que permite agrupar circuitos de recolha que tenham características idênticas e, dentro destes grupos, escolher os circuitos com maior grau de representatividade, nos quais incide a amostragem. Assim é possível prever uma homogeneidade das características dos resíduos provenientes de circuitos do mesmo tipo (Levy & Cabeças, 2006).

Posteriormente, a Portaria acima referida foi revogada com a aprovação do PERSU II que apresenta (no Anexo II do plano), uma metodologia para a quantificação e caracterização dos RU (APA, 2011). Os resíduos alvo desta metodologia dizem respeito aos resíduos sólidos residuais (RSR) isto é, a fração de resíduos de habitações e co-recolhidos, nomeadamente comércio, edifícios departamentais e serviços, produzidos diariamente e recolhidos de forma indiferenciada, bem como às frações recolhidas seletivamente que dizem respeito às embalagens usadas (incluindo papel e cartão não embalagem) e os RUB (Correia, 2007).

Porém, com o aparecimento da Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008, houve ainda a necessidade de promover uma maior harmonização do quadro normativo, pelo que a Portaria n.º 851/2009, de 7 de Agosto, revoga a metodologia prevista no PERSU II (APA, 2011). Assim sendo, os RU que podem ser quantificados e caracterizados são os resíduos provenientes da recolha indiferenciada e seletiva (papel/cartão, vidro, plástico, metal e RUB) (Portaria n.º 851/2009, de 7 de Agosto).

Os resultados da caracterização podem ser reportados através do Sistema Integrado de Registo da Agência Portuguesa do Ambiente (SIRAPA) disponibilizado, por via eletrónica, através do MRRU, formulários específicos relativos à caracterização dos RU (APA, 2011).

2.3.2. Caracterização física dos resíduos urbanos produzidos em Portugal Continental

Os resultados da caracterização física média dos RU produzidos no Continente, em 2013, elaborada com base nas especificações técnicas da Portaria n.º 851/2009, de 7 de Agosto, são apresentados na **Figura 1**.

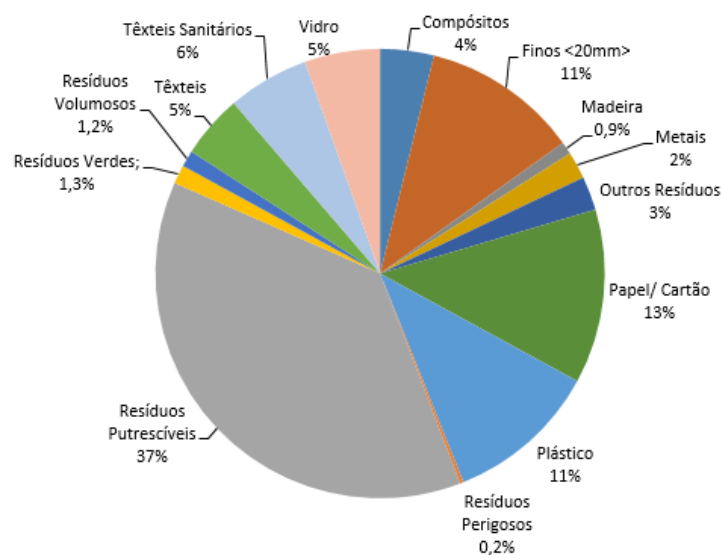


Figura 1: Resultados da caracterização física média dos RU produzidos no Continente, em 2013, elaborada com base nas especificações técnicas da Portaria n.º 851/2009, de 7 de agosto.

(Fonte: APA, 2013)

Do total de RU produzidos, a maior fração, cerca de 52,6% (valor do somatório das categorias bio-resíduos, resíduos verdes (recolhidos em separado) e papel/cartão incluindo ECAL,

conforme pressupostos adotados para monitorização do cumprimento da Diretiva Aterros) corresponde a RUB, valor ligeiramente inferior ao assumido para efeitos de cálculo no PERSU 2020, 55%. Destes resultados, destaca-se ainda a elevada fração de resíduos recicláveis que constituem os RU (cerca de 74%), e que na sua maioria podem ser objeto de valorização, justificando o investimento em medidas efetivas tendentes à sua recuperação (Silva *et al.*, 2014).

2.4. Tipos de recolha de resíduos urbanos

O Homem tem sido incentivado a práticas de redução e de reutilização de resíduos, contudo a problemática da gestão de resíduos tem origem na sua produção, porque praticamente todas as atividades humanas dão origem a resíduos. Uma vez produzidos, os resíduos têm de ser depositados, recolhidos e transportados, do local onde são produzidos, para o local onde serão processados, valorizados ou depositados em aterro sanitário. A recolha dos resíduos pode ser de dois tipos: indiferenciada e seletiva (Martinho & Gonçalves, 2000).

O sistema de recolha de RU é a componente mais dispendiosa do sistema de gestão de RU, pelo que a forma como os resíduos são recolhidos e transportados condiciona a eficiência dos processos de tratamento subsequentes. Assim sendo, é importante investir em recolhas seletivas para reduzir custos da recolha indiferenciada e permitir a maximização da valorização de resíduos (Martinho & Gonçalves, 2000). Em 2013, em Portugal continental, foram produzidos aproximadamente (\approx) 4,362 milhões de toneladas (t) de RU (representando uma diminuição de cerca de 4% em relação a 2012), o que corresponde a uma capitação anual de 438 kg/hab.ano, ou seja, uma produção diária de 1,20 kg de RU por habitante. Da totalidade dos RU recolhidos, 87% foram provenientes de recolha indiferenciada e 13% de recolha seletiva (Fernandes *et al.*, 2014).

2.4.1. Recolha indiferenciada

Num sistema de recolha indiferenciada os RU são recolhidos sem separação prévia. Após a recolha, os resíduos são depositados diretamente em aterro sanitário, ou podem ser valorizados se existirem infraestruturas adequadas, como é o caso de uma unidade de TMB. Na unidade de TMB os resíduos são submetidos a múltiplos processos de tratamento mecânico e biológico de forma a separar os RU por fluxos diferenciados de forma a maximizar a recuperação dos resíduos recicláveis (plástico, metais ferrosos e não ferrosos, papel/cartão e vidro); valorizáveis (MO e

CDR) e refugos, diminuindo assim a deposição em aterro sanitário (ERSUC, 2013). Contudo, a valorização dos resíduos recolhidos indiferenciadamente tem como principal inconveniente o nível de contaminação dos resíduos recicláveis que lhes dá um valor comercial mais baixo ou mesmo inaceitável para as indústrias de reciclagem (Martinho & Gonçalves, 2000).

Em Portugal, a entrada em funcionamento de novas instalações TMB permitiu uma redução de 53% dos RUB depositados em aterro sanitário, face aos valores de 1995, tendo sido quase atingida a meta proposta. Em 2013, foram produzidas 60.831 t de composto, das quais 47.558 t foram proveniente da recolha indiferenciada de RUB, sendo o restante proveniente da recolha seletiva de RU (Silva *et al.*, 2014). Contudo, apesar de ser possível extrair a fração orgânica dos resíduos indiferenciados, esta opção resulta num processo de compostagem mais demorado e num produto que poderá estar contaminado (devido ao contacto com determinados tipos de materiais, tais como, contaminantes químicos), o que poderá afetar a eficiência do processo, assim como influenciar a qualidade do composto final, podendo, inclusive inviabilizar a sua comercialização ou utilização (Castanheira *et al.*, 2004).

2.4.2. Recolha seletiva

A recolha seletiva visa a separação na fonte, pelo produtor, de uma ou mais categorias de resíduos (fração orgânica, resíduos verdes e recicláveis como o plástico, metal, papel/cartão, vidro, resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE), entre outros) que pode ser seguida, ou não, de uma segunda separação em estações de triagem (Martinho & Gonçalves, 2000). A recolha seletiva se for recolha porta a porta, para além de permitir saber a origem dos resíduos, permite uma melhor separação na fonte.

Este tipo de recolha tem como objetivos: (a) o aumento da quantidade e qualidade dos resíduos recicláveis; (b) redução do consumo de matérias-primas pela indústria, economizando recursos naturais; (c) redução do consumo de energia; (d) redução do volume de resíduos encaminhados para aterro sanitário e (e) redução dos impactes ambientais, impulsionados pela deposição adequada de REEE, entre outros, cujos constituintes são considerados perigosos para a saúde pública (Levy & Cabeças, 2006). Para além destes, destaca-se a valorização da fração orgânica dos RU por compostagem, para obter de um composto estável de melhor qualidade.

2.4.2.1. Recolha seletiva da fração orgânica

O sucesso da compostagem está principalmente na origem da fração orgânica dos resíduos e na sua correta separação na fonte. Apesar de ser possível extrair a fração orgânica a partir dos resíduos indiferenciados, esta opção torna o processo mais demorado e origina um composto final com uma qualidade inferior, devido à diversidade dos RU e à sua possível contaminação. Assim sendo, a separação da fração orgânica permite: (a) obter uma matéria-prima de boa qualidade; (b) desviar os RUB dos aterros sanitários; (c) obter um composto de elevada qualidade, de fácil comercialização e aplicação como fertilizante orgânico (na agricultura e em jardins), concorrendo com outros adubos e corretivos orgânicos (devido aos cumprimento dos padrões de qualidade exigidos para a venda do produto), o que se traduz em vantagens para o meio ambiente. A separação da fração orgânica na origem permite também estimular a compostagem doméstica no seio de pequenas comunidades locais (Comissão Europeia, 2000; Livro Verde, 2008).

Em Portugal, nomeadamente, em Lisboa e no Porto já é realizada compostagem a partir da recolha seletiva de RU. Em 2013, foram produzidas 13.273 t de composto, tendo sido o sistema de gestão de RU do Porto responsável pela maior parte da produção. Esta quantidade é relativamente pequena, quando comparada com a quantidade de composto produzido a partir da recolha indiferenciada, 47.558 t (Silva *et al.*, 2014). Porém, a recolha seletiva da fração orgânica é essencial para assegurar uma produção final limpa e não contaminada de matéria-prima (Castanheira *et al.*, 2004).

2.5. Encaminhamento dos resíduos urbanos

Os dados obtidos no que respeita às opções de gestão de RU, indicam uma tendência de cumprimento dos objetivos do PERSU 2020. Em 2013, dos RU produzidos em Portugal continental (4,362 milhões de toneladas), 43% foram depositados em aterro sanitário (e os restantes distribuídos de acordo com as seguintes operações de gestão: 22% valorização energética, 17% TMB, 9% valorização material, 7% tratamento mecânico (TM) e 2% VO) (Fernandes *et al.*, 2014). Através da análise da **Figura 2**, observa-se que em 2013, apesar da deposição em aterro sanitário ainda representar 43% do destino direto dos RU, esta desceu 12% face a 2012, um decréscimo bastante superior ao verificado nos últimos anos. Este resultado reflete a entrada em funcionamento de algumas das unidades de TMB e TM previstas, assumindo-se como um passo importante na inversão da tendência de preponderância do

aterro sanitário como destino direto dos RU, que será reforçada com a concretização dos projetos em curso e planeados em matéria de valorização orgânica (APA, 2013).

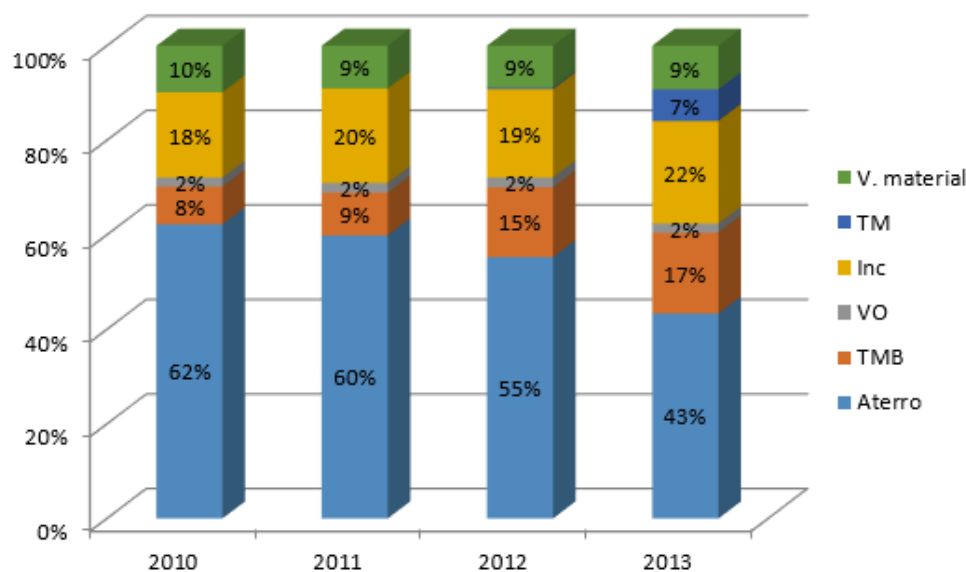


Figura 2: Destino direto dos resíduos urbanos (V. material - valorização material; TM - tratamento mecânico; Inc - incineração; VO - valorização orgânica; TMB - tratamento mecânico e biológico; aterro).

(Fonte: APA, 2013)

Relativamente à meta nacional de desvio de 50% de RUB de aterro sanitário (face aos valores de 1995) aplicável em 2013, verificou-se que Portugal esteve muito próximo de a atingir, tendo-se registado 53% de deposição, contrariando algumas expectativas mais negativas e dúvidas surgidas nos últimos anos sobre a estratégia seguida (APA, 2013). Contudo, em 2013, foram depositadas em aterro 1,196 milhões de toneladas de RUB, o que representa uma diminuição de 12% face ao ano anterior (Fernandes *et al.*, 2014).

2.5.1. Impactes ambientais da deposição de resíduos urbanos em aterro sanitário

A gestão de resíduos, em particular dos RUB, é uma questão cada vez mais preocupante, devido à sua gestão inadequada em aterro sanitário, não aproveitando o seu potencial de valorização e causando pressões sobre o meio ambiente. Neste sentido, e numa Europa cada vez mais consciencializada dos problemas ambientais associados à deposição dos resíduos biodegradáveis em aterro sanitário, foram criadas diretivas europeias com metas para redução

da deposição de RUB em aterro, que posteriormente foram transpostas para a legislação nacional (Castanheira, *et al.*, 2004).

A deposição de resíduos nos aterros sanitários, embora seja a opção menos favorável, de acordo com a hierarquia dos resíduos continua a ser o método de eliminação de RU mais utilizado em Portugal. Por consequência, os aterros sanitários apresentam elevadas taxas de ocupação, o que implica uma redução do tempo de vida útil inicialmente programado para este tipo de infraestruturas. Este feito deve-se, fundamentalmente, à deposição desnecessária de materiais passíveis de sofrerem valorização material (reciclagem) ou orgânica, desaproveitando-se o potencial económico e ambiental destes (Castanheira *et al.*, 2004).

No caso dos resíduos de embalagens, que têm características que permitem a sua reciclagem, quando depositados em aterro sanitário originam problemas de ocupação do espaço e constituem uma barreira ao aumento da taxa de reciclagem. Os resíduos orgânicos entram num processo de decomposição, em condições anaeróbias, sendo responsáveis pela produção de águas lixivantes e biogás, que têm impactes ambientais negativos e trazem problemas acrescidos na exploração da infraestrutura do aterro sanitário (Castanheira *et al.*, 2004).

O biogás produzido no aterro sanitário é, basicamente, composto por dois dos principais gases que contribuem significativamente para o efeito de estufa, o metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Devido à sua implicação no meio ambiente, o biogás tem que ser extraído para o exterior através de poços de extração construídos para o efeito, de forma a evitar a libertação direta deste para a atmosfera. Caso apresente viabilidade económica e técnica de exploração, o biogás deve ser aproveitado para produção de energia térmica e energia elétrica, através de sistemas de reaproveitamento do biogás (Castanheira *et al.*, 2004).

As águas lixivantes (com elevada carga orgânica) formam-se a partir da água com origem em fontes externas, como precipitação e escoamentos superficiais ou como resultado da decomposição dos resíduos, arrastando consigo produtos em decomposição e substâncias quimicamente ativas. Se esta infraestrutura não estiver convenientemente impermeabilizada e se não houver um sistema de drenagem e captação das águas lixivantes instalado, como menciona a legislação, os líquidos contaminados podem atingir os cursos de água ou lençóis freáticos e consequentemente, gerar graves problemas de poluição da água e do solo. Neste sentido, é importante recolher as águas lixivantes produzidas num aterro sanitário e encaminhá-las para uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), de modo a sofrerem um tratamento adequado e obedecerem aos valores limites estabelecidos por lei no que respeita às suas características químicas (Castanheira *et al.*, 2004).

Os aterros sanitários podem ainda ser uma fonte de perturbações para as áreas limítrofes, devido ao facto de originarem bio-aerossóis, odores e perturbações visuais. Outro impacto negativo da deposição em aterro é a superfície de terreno utilizado, que é maior que a necessária para outros métodos de gestão dos resíduos (Livro Verde, 2008).

A deposição em aterro sanitário significa a perda irrecuperável de recursos e terras, não havendo praticamente nenhum aspeto positivo na deposição em aterro de resíduos biodegradáveis (Livro Verde, 2008). Contudo, apesar das metas existentes em Portugal para reduzir a deposição dos resíduos com destino final em aterro, este tipo de infraestrutura vai sempre existir, ou como infraestrutura complementar de apoio aos demais processos de tratamentos (destino final de refugos), ou como solução única de tratamento (Levy & Cabeças, 2006). Contudo, deve-se evitar ao máximo a deposição de RU em aterro sanitário, apostando nas estratégias de valorização, reduzindo assim as pressões sobre o meio ambiente.

2.5.2. Valorização orgânica

A valorização de resíduos é uma operação que permite o reaproveitamento dos resíduos, sendo uma opção viável para reduzir a deposição de resíduos em aterro sanitário. Segundo o Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, a valorização dos resíduos corresponde a *“qualquer operação, cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico ou preparação dos resíduos para esse fim na instalação ou conjunto da economia”*.

Após a apresentação dos resultados da caracterização física dos RU em Portugal, no tópico 2.3.2, foi destacado que 52,6% dos resíduos são compostos por MO. Esta, se for objeto de valorização orgânica, permite obter um composto com características de húmus e que pode ser utilizado para enriquecimento dos solos, tal como os fertilizantes químicos. A VO pode processar-se por digestão anaeróbia ou por compostagem. Em ambos os processos a valorização realiza-se por microrganismos em condições controladas, mas num efetua-se sem a presença de oxigénio, e noutro, pelo contrário, com presença de oxigénio, respetivamente (Levy & Cabeças, 2006).

Para além da vantagem resultante da produção de um composto, a VO apresenta-se como alternativa válida à redução do volume e peso dos resíduos orgânicos a depositar em aterro sanitário, permitindo o aproveitamento do seu potencial de valorização e redução da produção de gases com efeito de estufa (GEE) (Castanheira *et al.*, 2004). A VO é um processo,

conjuntamente com o da valorização energética, que deve ser ponderado evitando a deposição direta e total dos resíduos em aterro sanitário (Levy & Cabeças, 2006).

Em 2013, dos 23 sistemas de gestão de RU existentes, em Portugal, 14 possuíam infraestruturas de VO, perfazendo um total de 18 infraestruturas de VO. Essas 18 infraestruturas de VO correspondiam a: (a) 7 de digestão anaeróbia; (b) 4 de compostagem; (c) 1 de digestão anaeróbia e compostagem; (d) 2 de VO de RUB (RU provenientes de recolha seletiva) e (e) 4 de compostagem de verdes (Silva *et al.*, 2014). Em termos gerais, o número de infraestruturas está estabilizado, encontrando-se em construção sobretudo instalações de VO, que visam incrementar o desvio direto de resíduos de aterro sanitário aumentando o quantitativo de resíduos recicláveis recuperados (Silva *et al.*, 2014).

A VO sob a forma de digestão anaeróbia seguida de compostagem do digerido é a opção mais utilizada na Europa. Esta opção permite melhorar a estabilização do composto, reduzindo o teor de patogénicos, e dar-lhe um destino final adequado, visto que contém nutrientes que são favoráveis para uso no solo (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

2.5.2.1. Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo que envolve a degradação biológica da matéria orgânica em condições de ausência de oxigénio. Após o pré-tratamento dos resíduos orgânicos – desarenação, crivagem, hidratação, homogeneização, estes dão entrada num digestor, onde se irá dar o processo de degradação por meio de bactérias anaeróbias e metanogénicas que processam a MO, resultando dois tipos de produtos: a lama digerida (MO resistente) e o biogás (um gás contendo principalmente CH_4 e CO_2) (Levy & Cabeças, 2006; Castanheira *et al.*, 2004).

A matéria digerida pode ser, posteriormente e através de centrifugação, separada em fração líquida e fração sólida (lamas), sendo que esta última pode sofrer eliminação (em aterro sanitário) ou um processo de compostagem para maturação e estabilização do produto. No final desta fase, o composto obtido estará pronto para ser aplicado como corretivo orgânico. Relativamente ao efluente líquido, este poderá ser recirculado para o digestor, ou ser encaminhado para ETAR (Castanheira *et al.*, 2004).

A digestão anaeróbia apresenta como principais vantagens: (a) a estabilização e higienização completa dos resíduos; (b) o aproveitamento do biogás produzido envolve um menor consumo energético comparativamente à compostagem, uma vez que através do biogás pode produzir-

se energia térmica para aquecimento do digestor, e energia elétrica para autoconsumo, por cogeração; (c) o composto produzido é um fertilizante; (d) quanto ao refugo, este é em menor quantidade quando comparado com a compostagem. Contudo, o processo de digestão é condicionado pela qualidade dos RU, especialmente, percentagens de carbono (C) e azoto (N), pelo tempo de retenção do digestor, pela temperatura, teor de água e pH (Levy & Cabeças, 2006).

A digestão anaeróbia tem como desvantagens: (a) produção de odores; (b) impacte visual, a nível da estética do digestor; (c) pode ocorrer alguma poluição sonora; (d) este tipo de infraestruturas atrai aves (*e.g.*, gaivotas), insetos e roedores, o que causa problemas de higiene, e (e) pode causar problemas de segurança, devido a ocorrência de incêndios causados pela produção de biogás (Levy & Cabeças, 2006).

2.5.2.2. Compostagem: objetivos e quantitativos do composto produzido em Portugal

A compostagem é outra forma de valorização da fração orgânica dos RU e, têm como objetivos: (a) transformar a matéria orgânica biodegradável num material biologicamente estável na presença de O₂, e no processo reduzir o volume original de MO (b) destruir agentes patogénicos, ovos de insetos, organismos indesejados e outras sementes que possam estar presentes nos RU; (c) reter o conteúdo máximo de nutrientes (azoto, fósforo e potássio); (d) garantir as condições de equilíbrio entre as fontes de carbono e de nutrientes presentes no meio, nomeadamente no que se refere à relação entre C e N disponíveis, e (e) produzir um produto estabilizado que pode ser utilizado para suportar o crescimento das plantas como um condicionador do solo (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Oliveira *et al.*, 2009). Nas centrais de tratamento de RU, a compostagem tem como objetivo principal reduzir o volume de resíduos em aterro sanitário, valorizando a MO, seguido dos objetivos gerais supracitados.

Relativamente ao produto da compostagem, os quantitativos de composto produzido em Portugal de 2010 a 2013 encontram-se na **Tabela 1**. Em 2013 foram produzidas 60.831 t de composto, das quais 13.273 t foram provenientes da recolha seletiva de RUB, e a maior quantidade, 47.558 t foram provenientes da recolha indiferenciada de RU. A título de curiosidade, refere-se que foi vendido cerca de 73% do total de composto produzido (Silva, *et al.*, 2014).

Através da análise dos resultados observa-se que em 2013 ocorreu uma ligeira recuperação dos quantitativos de composto produzido face ao ano anterior, que não atingem ainda os valores de 2011. Contudo, esperava-se que os quantitativos de composto produzido em 2013 fossem superiores, por via da entrada em pleno funcionamento de algumas instalações TMB. Os quantitativos de composto obtido através de MO recolhida seletivamente mantêm-se estáveis (Silva *et al.*, 2014).

Tabela 1: Quantitativos de composto produzido (t).

(Fonte: Silva *et al.*, 2014)

Produção de composto (em toneladas) a partir de...	2010	2011	2012	2013
RUB recolhidos seletivamente	13.093	11.817	13.005	13.273
RU (recolha indiferenciada)	35.607	54.718	43.488	47.558
Total	48.701	66.535	56.493	60.831

2.6. Compostagem

A compostagem consiste na degradação biológica aeróbia da matéria orgânica, efetuada por microrganismos em condições controladas. Os microrganismos decompõem a MO em compostos mais simples, dando origem a um composto esterilizado que pode ser aplicado no solo como corretivo, melhorando a sua estabilidade, sem provocar impactes ambientais negativos, neste ou na Saúde Pública (Castanheira *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2009). A compostagem pode ser realizada de diferentes formas: em grandes instalações centralizadas com MO recolhida seletivamente; em explorações agrícolas ou agropecuárias; em pequenas unidades de carácter familiar (compostagem doméstica) ou grandes unidades de carácter municipal (Brito, 2005). Todos os processos de compostagem aeróbia são semelhantes e incorporam três etapas básicas: (1) pré-processamento dos RU, (2) decomposição aeróbia da fração orgânica de RU, e (3) preparação e comercialização do produto final após estabilização e maturação (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Na primeira fase os resíduos sofrem um pré-tratamento para retirar materiais que possam contaminar a fração orgânica, no qual é feita uma triagem dos materiais passíveis de serem reciclados (plástico, metal, vidro, papel, entre outros), e segue depois para o tratamento biológico onde ocorre a fase de decomposição (Levy & Cabeças, 2006).

É na segunda fase que se dá a fermentação da MO, ou seja, a compostagem propriamente dita, e pode ser realizada de forma lenta ou de forma acelerada. Em ambos os casos, tem que ser facultado O_2 ao processo (por se tratar de uma decomposição aeróbia), quer de forma natural com o revolvimento das pilhas (por máquina hidráulica) ou com injeção forçada de ar. A decomposição da MO também pode ser realizada sem a presença de O_2 e a baixas temperaturas, o qual é denominado digestão anaeróbia (Castanheira *et al.*, 2004). A presença de humidade no processo de compostagem é fundamental, pelo que a quantidade de água a adicionar ao sistema deve ser controlada de forma a proporcionar condições de humidade adequadas à atividade microbiana. O excesso de água no processo faz com que os espaços entre partículas fiquem preenchidos, dificultando a circulação de ar, o que pode levar a condições anaeróbias. Os microrganismos utilizam o carbono disponível como fonte de energia, resultando a libertação de CO_2 , vapor de água e energia sob a forma de calor que não é utilizada no metabolismo (Castanheira *et al.*, 2004).

Na terceira e última fase, o composto deve sofrer um processo de maturação, onde se procede à estabilização e eliminação da fitotoxicidade do produto, garantindo assim padrões de qualidade para aplicação no solo (Levy & Cabeças, 2006).

Nos processos de compostagem em que a matéria-prima é as lamas digeridas do processo de digestão anaeróbia, os passos básicos são: (1) misturar as lamas desidratadas com um agente de volume (2) arejar a pilha de compostagem, seja por forma natural com revolvimento mecânico, quer por injeção forçada de ar, ou por ambos; (3) maturação do composto; (4) recuperação do agente de volume (se possível) e (5) afinação do composto (Metcalf & Eddy, 1995).

Após a referência das etapas da compostagem, são agora enunciadas as vantagens deste processo de VO (Russo, 2003): (a) rápida decomposição microbiana e oxidação da MO tornando-a estável com mínima produção de odores; (b) higienização do material devido às reações exotérmicas de decomposição; (c) produção de um fertilizante natural não contaminante das águas subterrâneas ou superficiais, como acontece com os fertilizantes minerais (químicos, que lixiviam); (d) tratamento menos dispendioso relativamente a outros tipos de tratamento, quando se entra em consideração com os ganhos ambientais resultantes; (e) Pereira Neto (1987) afirma que a maior parte dos sistemas usam pouca quantidade de energia externa para funcionar, comparando com outros sistemas de tratamento e (f) Epstein *et al.* (1982) refere ainda a grande flexibilidade em escala de operação.

As vantagens supracitadas são possíveis quando os processos escolhidos forem os adequados em tecnologia, projeto e operação. Em caso contrário ocorrem vantagens parciais, *e.g.*, devido ao mau produto resultante e por estabelecer más relações com a vizinhança das instalações de compostagem (devido à emissão de odores, quase sempre ligadas às disfunções destas estruturas por um ou vários dos aspetos referidos). Para além destas consequências, há as limitações devido à necessidade de maior área de terreno disponível que outros processos de tratamento e maior utilização de mão-de-obra (em certas circunstâncias poderá não ser uma desvantagem, mas exatamente o contrário, por absorver mão-de-obra, quase sempre não especializada) (Russo, 2003).

2.6.1. Tecnologias de compostagem

Os dois métodos de compostagem mais usuais podem ser classificados como revolvidos ou estáticos. No método revolvido, o material a ser compostado é revolvido periodicamente para introduzir oxigénio, controlar a temperatura e para misturar o material de forma a obter um produto mais uniforme. No método estático, o material a ser compostado permanece estático e o ar é soprado através do material de compostagem em sistemas de compostagem em vasos ou túneis (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Os sistemas mais simples são denominados de compostagem lenta, que pode ser realizada em pilhas. No caso das pilhas a oxigenação será realizada quer por revolvimento mecânico (sistema dito com revolvimento), quer por entrada forçada de ar (sistema dito estático). No sistema estático a entrada de ar pode verificar-se, quer por aspiração, quer por insuflação do ar. Este processo é o mais utilizado, por permitir a propagação do calor no centro da pilha para as zonas periféricas, facto que irá acelerar o processo. A compostagem acelerada verifica-se em reatores (como é o caso dos túneis de compostagem), nos quais é possível o controlo da temperatura, da humidade e das condições aeróbias, para além de se verificarem condições que funcionarão como catalisadores da degradação da matéria orgânica submetida a tratamento (Oliveira *et al.*, 2009).

A escolha entre condições de compostagem lenta ou acelerada irão depender da quantidade de resíduos a compostar, dos custos associados e da área disponível. Deve-se ter em conta que os custos associados à compostagem lenta são, em geral, mais baixos e que exige uma área superior à da compostagem acelerada (Oliveira *et al.*, 2009). Os três principais sistemas de

compostagem utilizados são: pilha estática arejada, pilha revolvida e reatores fechados (túnel), pelo que vão ser descritos seguidamente (Metcalf & Eddy, 1995).

◆ Sistema reator: túnel de compostagem

Na compostagem em túnel reator, a fermentação rápida dá-se de forma ativa num túnel reator paralelepípedo totalmente fechado, com volume que pode variar entre 10 e 500 m³ (com largura típica de 30-50 m e alturas de 4-6 m) (Levy & Cabeças, 2006). O processo biológico ocorre com elevado grau de decomposição, num curto espaço de tempo, com controlo por sistemas de ventilação e humidificação, monitorização a partir de um processador, sistema operacional de tratamento de ar de modo a cumprir com elevados requisitos ambientais (Kompoferm, s.d.).

Os resíduos a compostar são diariamente empilhados no interior do túnel por máquina hidráulica até ao seu enchimento. O composto fresco é também removido por máquina hidráulica (Levy & Cabeças, 2006). O número de túneis é escolhido de acordo com a capacidade de instalação proposta. Em cada túnel reator são controlados separadamente os sistemas de ventilação, humidificação e tratamento de ar (Christensen, 2011).

Segundo Levy e Cabeças (2006) a matéria permanece no interior do túnel entre 7 a 28 dias com arejamento forçado e remoção de gases, que devem ser tratados antes de serem libertados para a atmosfera. Por sua vez Christensen (2011), afirma que o tempo de retenção do composto nos diferentes sistemas de túneis varia entre 7 a 49 dias. Ambos referem que após permanência em túnel, segue-se a fase de maturação em pilhas ao ar livre durante 30 a 70 dias.

Este tipo de sistema de compostagem tem sido a opção de muitas indústrias para compostagem, devido às suas características, que mantém um perfil de temperatura e humidade relativamente homogéneo ao longo da altura da pilha de composto, ao tratamento de gases e não haver a necessidade de revolvimento (Christensen, 2011). Contudo, por vezes, a elevada compactação que o material apresenta no interior do túnel, em consequência do próprio método de movimentação, proporciona deficiências de arejamento no seu interior, criando condições para que a matéria entre em fermentação anaeróbia (Levy & Cabeças, 2006).

◆ Sistema de pilhas estáticas arejadas

O processo de compostagem em pilha estática arejada consiste em colocar tubos (normalmente tubos descartáveis de plástico canelado) sobre a fração orgânica dos RU a compostar. Cada pilha é normalmente abastecida por um ventilador individual para controlar melhor o arejamento. O

ar é introduzido para fornecer o O_2 necessário para a conversão biológica e para controlar a temperatura no interior da pilha. Os ventiladores são normalmente controlados por um temporizador, ou em alguns sistemas por um microcomputador para corresponder a um perfil de temperatura específico (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

A falta de revolvimento na compostagem em pilha estática requer a manutenção da porosidade adequada e a redução do excesso de humidade. Para colmatar esta situação, é usual adicionar-se agente de *bulking* (agente de volume, normalmente casca de madeira, colocado através de um moinho rotativo ou misturador de tambor ou por um equipamento móvel) de forma a melhorar a ventilação natural. Para finalizar, as pilhas são frequentemente cobertas por uma camada de "composto maturado" (CM) para evitar a perda de calor a partir da camada superior e proporcionar um maior controlo de odor. Para uma melhor processo e controlo de odores, a totalidade ou porções significativas do sistema em instalações mais recentes são cobertos ou fechados (Metcalf & Eddy, 1995; Tchobanoglous *et al.*, 1993).

A altura das pilhas de compostagem variam entre 2,0 a 2,5 m de altura. A fermentação decorre durante um período de 21-28 semanas de acordo com perfil específico de temperatura, seguido de um período de maturação em pilhas revolvidas de 30 dias. Após a compostagem, o composto é afinado, e o agente de volume é recuperado (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Metcalf & Eddy, 1995; Christensen, 2011).

◆ Sistema de pilhas revolvidas

Os sistemas de pilhas revolvidas são a tecnologia mais antiga e mais simples de compostagem. Estas são alongadas, podem ser cobertas ou fechadas ou ainda semelhantes às pilhas estáticas arejadas (Metcalf & Eddy, 1995; Christensen, 2011). As dimensões da pilha e a forma (triangular ou trapezoidal) dependem do tipo de equipamento que vai revolver a pilha. O comprimento da pilha depende das quantidades de resíduos e o espaço disponível (Christensen, 2011). Porém, existe literatura que refere algumas dimensões ideais: (a) Tchobanoglous *et al.* (1993) refere uma altura de $\approx 2,5$ -3,0 m para uma base de $\approx 6,0$ -7,5 m; (b) Metcalf & Eddy (1995) apontam para uma altura de 1,0-2,0 m e uma largura de 2,0-4,3 m; (c) mais recentemente, Christensen (2011) afirma que para resíduos biológicos a altura é de 1,0-2,5 m para uma base de 3,0-4,0 m, sendo que as dimensões variam consoante a tipologia de resíduos.

As pilhas de compostagem são misturadas periodicamente no decorrer do processo de compostagem, através do revolvimento mecânico por equipamentos especializados (*e.g.*, volteadora de composto). Este processo permite aumentar a porosidade, quebrar aglomerados,

homogeneizar o material e, assim, equalizar humidade e gradientes de temperatura na pilha. Nos últimos anos, foi desenvolvido um equipamento especializado, de forma a misturar um agente de *bulking* (agente de volume), na MO de forma a promover um melhor arejamento da pilha. No entanto, ocorre muitas vezes libertações de odores ofensivos (Metcalf & Eddy, 1995; Christensen, 2011).

O período de compostagem é de cerca de 21 a 28 dias, sendo a pilha volteada durante o período de compostagem cerca de uma a duas vezes por semana (Metcalf & Eddy, 1995; Tchobanoglous *et al.*, 1993). Na maioria dos casos, uma maior frequência de revolvimento da pilha, diminui o tempo de retenção em compostagem, mas consequentemente há um aumento dos custos operacionais. As pilhas são ainda ventiladas naturalmente, como resultado da difusão e da conversão (Christensen, 2011). As pilhas podem também ser maturadas durante um mês sem revolvimento (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

2.6.2. Detalhes do sistema reator: em túnel de compostagem

O sistema reator em túnel, como já foi referido, é um sistema onde a fermentação ocorre mais rapidamente, para além de que, as variáveis temperatura e teor de oxigénio, são monitorizadas por um *software*. A altura da pilha de compostagem no sistema reator vai ter influência no tempo de permanência em túnel. Assim sendo, é importante recorrer a uma gama de alturas ótimas para a pilha de compostagem e verificar qual o tempo de permanência em túnel, em dias, a ela associada, de forma a otimizar o processo de compostagem.

2.6.2.1. Alturas recomendadas para a pilha de compostagem em túnel reator

A compostagem é uma forma de tratamento de resíduos biodegradáveis que ainda tem alguma carência de literatura, para além de ainda não ter uma definição globalmente aceite, tem ainda em falta a descrição de uma gama de alturas ótimas para os sistemas em túnel reator. Assim sendo, as alturas recomendadas para este tipo de sistema vão de encontro das alturas *standard* para todos os tipos de pilhas, que vão ser descritas abaixo, e com as alturas recomendadas para o sistema mais semelhante com o túnel reator, o sistema de pilhas estáticas arejadas. O sistema de pilhas estáticas arejadas é muito semelhante ao sistema em túnel reator, com a diferença que os parâmetros não são controlados por um *software* continuamente e a pilha não se encontra numa estrutura fechada. O arejamento é fornecido à pilha por um sistema semelhante

ao do túnel reator: são colocados tubos na pilha de compostagem, onde o arejamento é feito por um ventilador controlado por um temporizador que controla o fornecimento de oxigénio necessário para a conversão biológica e para controlar a temperatura no interior da pilha e/ou em alguns sistemas por um microcomputador para corresponder a um perfil de temperatura específico. Segundo a literatura, as pilhas de compostagem estáticas variam entre 2,0 a 2,5 m de altura.

As dimensões e a forma ideal da generalidade das pilhas de compostagem pode ser variável, porque são variáveis que influenciam a velocidade de compostagem, nomeadamente pelo efeito que têm sobre o arejamento e a dissipação do calor da pilha. De uma forma geral, pode-se dizer que uma altura de 1,5 m poderá ser considerada de boa para a maioria dos materiais. No entanto, a altura ótima deve depender do sistema e das tecnologias de compostagem utilizadas. Uma pilha muito baixa não composta bem e não aquece rapidamente. Pelo contrário, as pilhas demasiado altas, com 2,5 m a 3,0 m, podem tornar-se demasiado quentes e inviabilizar o desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela compostagem e podem ficar muito compactas diminuindo o arejamento no seu interior (Brito, 2008).

Valente *et al.* (2009), publicaram um artigo relativo ao tema “Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos” (*“Issues concerning composting or organic residues”*), onde referem as alturas ideais para pilhas de compostagem por vários autores, como se pode verificar na **Tabela 2**. Refere ainda que para a compostagem de resíduos orgânicos, independente de sua origem e composição, uma altura ideal deve estar associada a um correto dimensionamento da pilha. Uma pilha de compostagem deve ter um tamanho suficiente para impedir a rápida dissipação de calor e humidade e, ao mesmo tempo, permitir uma boa circulação de ar.

Tabela 2: Alturas aconselhadas para os processos de compostagem.

(Fonte: Valente *et al.* 2009)

Autor (s)	Alturas aconselhadas (m)
Nunes (2003); Valente (2008)	1,0 m
Kiehl (2004)	1,5 m a 1,8 m
Costa <i>et al.</i> (2006)	1,8 m

Assim sendo, de acordo com o material a ser compostado, a altura das pilhas deve ser estabelecida tendo em conta que uma altura mínima de 0,80 m, abaixo da qual não existem condições adequadas para o aumento e manutenção da temperatura (Valente *et al.*, 2009).

2.6.2.2. Duração do processo de compostagem em túnel reator

A extensão e o período de tempo durante o qual ocorrerá a compostagem dependerá da natureza dos resíduos, do teor de humidade, dos nutrientes disponíveis, e outros fatores ambientais. Sob condições controladas, os resíduos orgânicos podem ser convertidos em composto estável num período razoavelmente curto de tempo (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Através da literatura, verificou-se que o tempo de permanência da matéria em túnel reator pode variar entre 7 a 49 dias, seguida de fase de maturação em pilhas ao ar livre durante 30 a 70 dias. Associado a uma altura ótima da pilha, o tempo de permanência do material em túnel, pode ser menor, desde que cumpra os parâmetros de higienização/esterilização definidos. Assim sendo, o processo de compostagem completo pode ir de 37 a 119 dias, dependendo das características das matérias e do tempo disponível para a compostagem dessas matérias.

Uma vez reunida a informação, acima mencionada, pode-se realizar um estudo de caso variando as alturas em pilha de compostagem em túnel reator, para que o tempo de permanência em túnel, em dias, seja menor mas cumprindo os parâmetros de higienização/esterilização. Este estudo permite reduzir os custos de produção de composto nas instalações de compostagem, associado a uma gama de alturas ótimas.

2.6.3. Fatores que interferem no processo de compostagem

A compostagem é um processo no qual a degradação biológica é efetuada por microrganismos diversificados responsáveis pela degradação da MO. Assim sendo, os fatores que afetam o processo são os que determinam a existência duma população diversificada de microrganismos necessários para completar a degradação, como sejam: o oxigénio para suprir os requisitos biológicos, a temperatura que afeta a velocidade das reações bioquímicas, e a água (expressa em termos de humidade), sem a qual não se processam as atividades metabólicas (Russo, 2003).

Para além dos fatores ambientais referidos, também são necessários nutrientes, expressos pela relação C/N, em quantidade adequadas para que os microrganismos possam exercer a sua

atividade. Outro fator que afeta o processo é de ordem operacional, o tamanho das partículas, ou seja, a granulometria que influencia o arejamento e a estabilidade geométrica das pilhas. Para além destes vão ainda ser referidos outros fatores que interferem numa boa compostagem. Contudo, Pereira Neto *et al.*, (1986) e Diaz *et al.*, (1993) reconhecem que o arejamento, a temperatura, o teor de humidade, a concentração de nutrientes e a granulometria do material são os principais fatores que afetam a compostagem.

♦ **Microrganismos (populações microbianas)**

A compostagem é um processo de fermentação biológica através do qual os microrganismos decompõem os compostos constituintes dos materiais libertando CO₂ e vapor de água, *i.e.*, os intervenientes principais deste processo são os microrganismos, que garantem a decomposição da MO, e para os quais devem ser mantidas condições de temperatura, pH e arejamento ótimas (Brito, 2005).

No início da fermentação rápida, há um intervalo de tempo em que as temperaturas vão subindo deste ≈15°C até aos 45°C e que consiste a fase mesofílica. A sua duração é de 12 a 24 horas, sendo durante este tempo que se desenvolvem as colónias de microrganismos responsáveis pela degradação da MO. Estes microrganismos são responsáveis pelo início da degradação, o que resulta numa diminuição do pH para valores de 4,5 a 6,5 e num aumento de temperatura devido ao processo de degradação ser exotérmico, libertando-se energia. Os microrganismos predominantes são os fungos mesofílicos e os actinomicetas, além de algumas bactérias mesofílicas e protozoários (Levy & Cabeças, 2006).

Com o aumento do número de colónias e garantindo-se a presença de ar, a temperatura vai aumentando até ase atingirem temperaturas termofílicas (temperaturas entre os 55°C e os 65°C). Quando se atinge os ≈45°C, inicia-se uma substituição gradual dos microrganismos, verificando-se, nomeadamente, o desaparecimento dos actinomicetas e dos fungos e bactérias mesofílicas, desenvolvendo-se uma flora termofílica capaz de resistir até temperaturas da ordem dos 65°C, constituída por fungos termofílicos e substâncias antibióticas. Nesta fronteira entre a fase mesofílica e a fase termofílica atinge-se o pH mais baixo do processo, cerca de 3,5 a 4, a partir do qual este sobe gradualmente até valores de 7 e 8,5. A atividade microbiológica mantém-se e a temperatura continua a aumentar até existir MO decomponível. Caso se ultrapasse os 65°C, os fungos termofílicos desaparecem, aparecendo bactérias termofílicas capazes de resistir até cerca de 75°C (Levy & Cabeças, 2006).

Os processos aeróbios são caracterizados tanto por temperaturas mesofílicas como termofílicas, pelo que convém realçar que a partir de temperaturas superiores a 75°C deixa de haver processos biológicos. Esta temperatura constitui o limite da atividade biológica, daí resulta que, se a massa de resíduos em fermentação a ultrapassar ocorre a morte de praticamente todos os organismos, sejam eles benéficos ou patogénicos, o que provoca a esterilização do composto. De realçar que um composto esterilizado não tem qualquer aplicabilidade como fertilizante (Levy & Cabeças, 2006).

A eliminação de organismos patogénicos é um elemento importante no processo de compostagem, porque afeta o perfil de temperatura de um processo de arejamento. Relativamente aos microrganismos patogénicos a eliminar, encontra-se na **Tabela 3** as suas condições de letalidade (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Levy & Cabeças, 2006).

Tabela 3: Letalidade de alguns microrganismos patogénicos.

(Fonte: Levy e Cabeças, 2006; Tchobanoglous *et al.*, 1993)

Micro-organismos patogénicos	Letalidade
<i>Salmonella typhosa</i>	Morte em 30 minutos a 55-60°C e em 20 minutos a 60°C.
<i>Salmonella sp</i>	Morte em 1 hora a 55°C e em 15 a 20 minutos a 60°C.
<i>Shigella sp</i>	Morte em 1 hora à temperatura de 55°C.
<i>Escherichea coli</i>	A maior parte morre em 1 hora a 55-60°C e em 15 a 20 minutos a 60°C.
<i>Entamoeba histolytica</i>	Morte a alguns minutos a 40°C e em alguns segundos a 55°C.
<i>Taenia saginata</i>	Morte em alguns minutos a 55°C.
<i>Trichinela spiralis</i> (larvas)	Morte rápida a 55°C e instantânea a 60°C.
<i>Brucella abortus</i>	Morte em 1 hora a 55°C e 3 minutos a 62° - 63°C.
<i>Micrococcus pyrogenes</i>	Morte em 10 minutos à temperatura de 50°C.
<i>Streptococcus pyrogenes</i>	Morte em 10 minutos à temperatura de 54°C.
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Morte em 15 a 20 minutos a 66°C e em alguns segundos a 67°C.
<i>Corynebacterium diphtherin</i>	Morte em 45 minutos à temperatura de 55°C.
<i>Necator americanus</i>	Morte em 50 minutos à temperatura de 45°C.
<i>Ascar lumbricoides</i> (ovos)	Morte em média em 1 hora a uma temperatura acima de 50°C.

Num sistema de compostagem com arejamento forçado e bem controlado (a temperatura pode ser regulada através da monitorização da temperatura e do controlo do fluxo de ar) é usualmente aceite que, após 7 dias com temperaturas entre os 55°C e os 65°C se garanta uma boa higienização do produto final (Levy & Cabeças, 2006). Estudos realizados por Knol, em 1959, (supracitado por Levy & Cabeças (2006)) referem ainda que vários géneros de *Salmonella* sobrevivem à compostagem, num sistema com arejamento forçado e a temperaturas entre 55°C e os 65°C, por um período superior a 14 dia. Estudos realizados por Pereira Neto, em 1987,

apontam no mesmo sentido, indicando serem necessários, para eliminar a mesma bactéria, pelo menos 16 dias com arejamento forçado e 30 dias com ventilação natural.

Na fase de maturação, já há pouca quantidade de MO, ocorrendo então a diminuição do número de colónias e da atividade microbiológica, surgindo uma diminuição gradual da temperatura até se atingir novamente os 45°C, que indica o fim da fase termofílica e o início de uma nova fase mesofílica. O composto ainda não totalmente maturado, resultante da fase termofílica, é normalmente designado por “composto fresco”, realçando-se o facto deste ainda não ter as características de composto propriamente dito, nomeadamente no que respeita à sua estabilização, humedificação e relação C/N (Levy & Cabeças, 2006).

O início de uma nova fase mesofílica, onde se inicia a maturação tem uma duração superior à da primeira fase mesofílica, referindo a maioria dos autores um tempo mínimo de 30 dias para a completa maturação do composto. A estabilização do composto e a eliminação da fitotoxicidade só são garantidas após completa maturação, onde se degradam as substâncias de estrutura complexa (Levy & Cabeças, 2006).

◆ Temperatura

O controlo da temperatura permite avaliar o modo como a compostagem vai evoluindo, assumindo especial importância no início da fase termofílica, assim como a determinação da temperatura máxima atingida nessa fase (Oliveira *et al.*, 2009). A manutenção de temperaturas termófilas na fase de degradação ativa acelera a decomposição da MO, promove a eliminação de microrganismos patogénicos e elimina ovos de helmintos, ovos de insetos e sementes de ervas daninhas (Pereira Neto, 1987). Contudo, a ocorrência de uma temperatura excessivamente elevada pode inibir a ação de enzimas, retardando a atividade dos microrganismos e, consequentemente o processo de compostagem (Russo, 2003).

Segundo Christensen (2011), a maioria dos estudos de compostagem concluíram que a temperatura ótima durante o período de compostagem acelerada é de cerca de 55°C. O mesmo autor afirma ainda que, a uma temperatura superior a 60°C a diversidade dos microrganismos é muito reduzida. A 70°C a atividade biológica total é de 10-15% menor do que a 60°C, enquanto, a 75-80°C, não é detetada nenhuma atividade biológica significativa. Durante a fase de cura/maturação, a temperatura ótima é de cerca de 40°C (Christensen, 2011).

Numa pilha em compostagem, as temperaturas desenvolvem-se do interior para o exterior de forma decrescente, quando aeróbias, com um perfil típico como o representado na **Figura 3** (Russo, 2003).

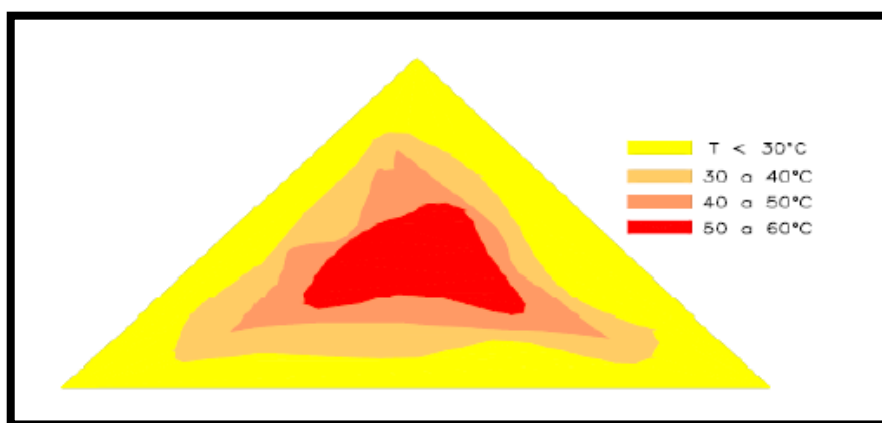


Figura 3: Perfil de típico de temperatura numa pilha aeróbia.

(Fonte: Russo, 2003)

♦ Taxa de oxigenação (arejamento)

O processo de compostagem é um processo aeróbio, *i.e.*, é um processo de degradação de MO levada a cabo por microrganismos que exigem a presença de O_2 para o desenvolvimento das suas atividades metabólicas. É fundamental que a concentração em O_2 não seja limitante do metabolismo microbiano, de forma a evitar valores excessivos de temperatura, a aumentar a velocidade e oxidação do material (quanto mais O_2 estiver disponível para os microrganismos mais rápidas e exotérmicas serão as reações de degradação) e diminuir a emissão de odores (Oliveira *et al.*, 2009; Levy & Cabeças, 2006).

A percentagem de O_2 na atmosfera é de 21%, porém os microrganismos aeróbios conseguem sobreviver em atmosferas com 5% de O_2 . Contudo, se a percentagem de O_2 for inferior a 10%, este elemento poderá ser limitante, nomeadamente quando os valores de O_2 descem dos 5% criando-se zonas de anaerobiose. No entanto, se a atividade anaeróbia não for excessiva a pilha de compostagem funcionará como um filtro que impedirá a libertação dos gases com mau odor que posteriormente serão degradados no seu interior. Se a atividade anaeróbia for intensa resultarão cheiros desagradáveis provenientes de um teor elevado de humidade e de necessidade de arejamento (Brito, 2005).

A manutenção de um arejamento eficaz é indispensável para que a compostagem se realize no mais curto período possível e para se prevenir a formação de odores desagradáveis, devido à formação de zonas em anaerobiose no interior da massa em tratamento (Oliveira *et al.*, 2009). Para o conseguir, o arejamento da massa em compostagem deve ser constante para que não se alterem as atividades metabólicas dos microrganismos e o processo de degradação da MO seja

mais rápido por via da oxidação de moléculas orgânicas presentes na massa (Russo, 2003). O ar pode ser fornecido por um ventilação ativa (arejamento forçado, ventilação induzida por vácuo, ou uma combinação dos dois), por ventilação natural (difusão, convecção) e, em menor medida, pela mistura e rotação. A ventilação natural não é tão eficaz como a ventilação ativa (sendo que os sistemas com arejamento forçado permitem um melhor controlo das condições de arejamento e são mais rápidas, uma vez que introduzem mais ar nas pilhas) (Christensen, 2011; Levy & Cabeças, 2006).

A temperatura verificada no interior da pilha de compostagem é o parâmetro que melhor traduz a taxa de utilização do O₂, e por consequente o melhor indicador da taxa de degradação da MO. A frequência ou intensidade do revolvimento deverão ser, por isso, decididas em função desse parâmetro (Oliveira *et al.*, 2009).

◆ Nutrientes e relação carbono/azoto

O desenvolvimento da população microbiana na matéria a compostar está diretamente relacionada com a concentração de nutrientes existentes, especialmente de carbono e azoto. Assim, o equilíbrio C/N é um fator fundamental para o correto funcionamento do processo de compostagem (Levy & Cabeças, 2006). Russo (2003) afirma que o conhecimento dos elementos C e N são fundamentais, pois integram elementos presentes nas células microbianas presentes no processo, em que C representa em média 50% e N representa 2 a 8%.

A relação C/N depende dos microrganismos e do meio de crescimento, onde 2/3 do carbono se perde como CO₂ e 1/3 se combina com o azoto nas reações celulares (Russo, 2003). O intervalo ideal da relação C/N depende da constituição do material a compostar, sendo que Levy & Cabeças (2006) e Christensen (2011) referem que a relação deve estar compreendida entre 20 e 30, e Tchobanoglous *et al.* (1993) referem que para a maioria dos resíduos orgânicos a relação é de 20 a 25 para 1. Apesar dos valores sugeridos na literatura para a relação ótima C/N para compostagem, constata-se que não poderá ser um rácio absoluto, mas que varia com as características do material a compostar (Russo, 2003).

Durante a fase inicial do processo podem ocorrer problemas devido ao valor inicial da relação C/N estar fora da gama apresentada: (a) relação C/N bastante elevada (> 35): a falta de N disponível face ao carbono existente implica um retardamento na formação de novas células, atrasando-se o processo de fermentação; (b) relação C/N muito baixa (< 20): não existe C suficiente para converter o N em material celular, havendo a perda de nutrientes e a libertação de N sob a forma de amoníaco ocorre através da população microbiana como uma tendência

para restabelecer o balanço entre os dois elementos (trazendo potenciais problemas de odor). A adição de papel ou de outros materiais celulósicos permitem aumentar as relações C/N demasiado baixas (Russo, 2003; Christensen, 2011).

De um modo geral, todo o azoto presente na maioria dos compostos orgânicos acaba por ficar disponível, ao passo que nem todo o carbono orgânico (C_{org}) será biodegradável (Tchobanoglous *et al.*, 1993). A disponibilidade de C é a maior fonte de energia para os microrganismos, porém a sua eficiência não é 100% e a carência de C é maior que a do N. Apesar da grande diferença de carências, a insuficiente concentração de N é limitante no processo, por ser essencial para o crescimento e reprodução celular (Russo, 2003). Segundo Zucconi *et al.* (1987), quando parte do carbono disponível é de difícil degradação, como ocorre em constituintes como a lenhina, celulose e hemicelulose, será aconselhável uma relação C/N maior, porque o C bio-disponível é inferior ao carbono total (C_t). Quando há um decréscimo da relação C/N inicial de 35 a 40/1 para uma relação final de 18 a 20/1, traduz-se normalmente por um avanço no grau de maturação. Por outro lado, se o material a compostar for rico em azoto, ou seja, com baixa relação C/N (10/1 ou inferior), com o avanço da degradação a relação tende a aumentar devido à perda do azoto.

Basicamente a relação C/N é utilizada como um bom indicador da estabilidade biológica do composto, definindo a qualidade do produto resultante da compostagem de resíduos urbanos (Morel *et al.*, 1985). A adição de um composto com elevada relação C/N no solo conduz à competição pelo azoto disponível, entre microrganismos e plantas, enquanto uma relação baixa pode favorecer o desenvolvimento das plantas (Russo, 2003).

◆ Teor de humidade

Os processos bioquímicos de degradação de MO exigem água, para proporcionar o ambiente húmido que a maioria dos microrganismos precisa para mover gases e líquidos através de suas membranas celulares (Levy & Cabeças, 2006; Christensen, 2011). É evidente que a mistura inicial de resíduos orgânicos é essencial para aumentar ou diminuir o teor de humidade para um nível ótimo (Tchobanoglous *et al.*, 1993). O TH é, na prática, controlado com base na eficácia de arejamento (manual ou mecânico), nas características físicas dos resíduos e na necessidade de satisfazer a carência de água (Levy & Cabeças, 2006).

Durante o processo de compostagem o calor produzido evapora grandes quantidades de água da massa em compostagem. A fim de evitar a ausência de humidade iniba a compostagem, o TH não deve ser inferior a 35-40%, e a mistura inicial deve rondar os 50% dependendo da matéria-

prima utilizada (Christensen, 2011). Na **Tabela 4** apresentam-se os valores iniciais e finais para o teor de humidade na perspetiva de diferentes autores.

Tabela 4: Teores de humidade inicial e final no processo de compostagem, por vários autores.

Autor (s)	Teor de Humidade Inicial	Teor de Humidade Final
Tchobanoglous <i>et al.</i> (1993)	50-60%	<40%
Levy e Cabeças (2006)	40-60%	30-40%
Oliveira <i>et al.</i> (2009)	50%	30%
Christensen (2011)	55-60%	35-45%

Quando o TH se situa acima do nível ótimo, a água começa a ocupar os espaços vazios da massa de resíduos, impedindo a livre circulação de O₂, podendo causar a ocorrência de focos anaeróbios, formação de gases odoríferos e uma maior produção de águas lixivantes. Geralmente, as matérias-primas tendem a ser húmidas em vez de muito secas, pelo que nestas situações é prática comum a adição de um agente de *bulking* de forma a reter humidade. A adição deste, no entanto, pode aumentar a massa de compostagem de forma significativa (Levy & Cabeças, 2006; Christensen, 2011).

Por outro lado, se o conteúdo de humidade for reduzido, a atividade biológica é muito limitada, retardando o processo de compostagem, podendo ser necessária a adição de água ou de matéria-prima com um conteúdo mais elevado de humidade. Para controlar o TH durante a compostagem, pode ser feita a medição na amostra de composto em laboratório, ou através de operadores experientes que são capazes de avaliar o TH com base numa inspeção visual ou um teste de aperto de mão (ou seja, muito seco se a amostra despedaça, muito húmido, se a água é libertada durante o apertar) (Christensen, 2011). Para compensar a perda de humidade durante a compostagem é adicionada água (pode ser lixiviado, água da chuva ou água da torneira) diretamente de forma a assegurar o TH necessário à mistura (Christensen, 2011).

No final do processo de compostagem, o composto final não deve ter um conteúdo de humidade superior a 35-45%, para evitar problemas de manuseamento, armazenamento e transporte. O “adubo” com um TH inferior ao referido pode aumentar a libertação de poeiras (Christensen, 2011).

◆ Agente de *bulking*

Um agente de volume, ou agente de *bulking*, possui como principal propriedade a resistência estrutural (*e.g.*, aparas/estilha de madeira que apresentam elevada resistência) e aumenta a

porosidade do material de partida, o que, por sua vez, melhora o arejamento durante a compostagem (exceto para os agentes de volume com partículas muito pequenas, tais como serradura). Além disso, a adição de um agente de volume seco como aparas de madeira, casca triturada ou serragem reduzem o TH da matéria-prima de entrada, como são exemplo as lamas de ETAR, aparas de relva, ou os desperdícios alimentares. Após a adição do agente de volume à matéria a compostar, a mistura têm maior biodegradabilidade e menor razão C/N do que a matéria-prima inicial (Christensen, 2011).

No entanto, a adição de um agente de volume pode aumentar de forma significativa a massa de compostagem, pelo que a quantidade a adicionar depende do TH da matéria-prima, do agente de volume e o teor de humidade desejado da mistura (Christensen, 2011). À adição do agente de volume à mistura a compostar é chamado rácio, *i.e.*, a razão entre a massa do agente de volume e a massa da matéria-prima, para que o TH na compostagem seja ótimo (Christensen, 2011).

◆ **Granulometria**

A maioria dos materiais que compreendem a fração orgânica dos RU tendem a ser irregulares na forma. Esta irregularidade pode ser substancialmente reduzida por trituração dos materiais orgânicos antes de serem compostados, sendo que o tamanho de partícula mais desejável para a compostagem é inferior 5 cm, mas as partículas de maiores dimensões podem ser compostadas (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

A granulometria do material a compostar constitui um fator determinante pela sua influência na forma como o processo de compostagem irá decorrer, devido em especial, aos seguintes fatores: (a) a granulometria determinará a superfície específica das partículas do material a compostar. Com a diminuição do diâmetro dessas partículas aumentará a respetiva superfície específica, facto esse que aumentará a eficiência potencial do ataque microbiano ao material orgânico biodegradável presente; (b) a diminuição do diâmetro das partículas facilitará a difusão do O₂, aumentando a eficiência do arejamento; (c) a redução e uniformização da dimensão das partículas tornará o material mais homogéneo e uniforme, em termos de densidade, de composição e de temperatura; (d) o material será tanto mais fácil de manusear quanto mais uniforme for, tornando mais fáceis e eficientes as operações de mistura; (e) as partículas não deverão, contudo, ser demasiadamente pequenas sob risco de favorecer a formação de agregados, aumentando o risco de compactação de água e de ar, tornando o material mais pastosos e mais difícil de manusear, ao mesmo tempo, com maior possibilidade de se formarem

zonas anaeróbias, causadoras de odores desagradáveis e conduzindo à produção de composto de pior qualidade (Oliveira *et al.*, 2009).

No que se refere à textura e à granulometria, será expectável que sofram modificações, apresentando o produto final um aspeto homogéneo, terroso, friável e uma elevada porosidade. Deverá, além disso, ser constituído essencialmente por partículas com um diâmetro inferior a 10 mm. Ao longo do período de compostagem, a mistura deverá apresentar uma elevada porosidade, não se verificando tendência para a formação de agregados estáveis de grandes dimensões que dificultariam o revolvimento da massa (Oliveira *et al.*, 2009).

◆ pH

O pH é considerado por vários autores como um dos fatores que afetam a compostagem, sendo importante para avaliar a estabilidade ambiental e microbiana dos resíduos. Contudo, o seu controlo durante o processo é de difícil concretização. Como o pH é auto regulado no processo de compostagem (tal como a temperatura varia com ao longo do tempo), controlá-lo durante o processo de compostagem não constitui, por isso, uma preocupação especial. (Russo, 2003; Tchobanoglous *et al.*, 1993).

A gama de pH ótima para a maioria das bactérias situa-se entre 6 e 7,5, enquanto para os fungos se situa entre 5,5 e 8 e tende, de um modo geral, a manter-se alcalino durante a compostagem, variando de 7,5 a 9 (Levy & Cabeças, 2006). Contudo nem todos os autores têm a mesma opinião relativamente ao valor de pH ótimo. Russo (2003) refere que a MO com pH variando de 3 a 11 pode ser compostada, apesar de valores próximos da neutralidade (5.5 a 8) serem considerados os melhores porque é nesta faixa que os microrganismos melhor se adaptam. Quando o pH no início da compostagem é elevado, associado a altas temperaturas, causa a perda de azoto por volatilização da amónia; Christensen (2011) situa o intervalo de pH ótimo entre 7 e 8; Por sua vez Tchobanoglous *et al.* (1993), menciona que o pH inicial dos RU orgânicos é tipicamente entre 5 e 7.

Os valores de pH descem ligeiramente durante a fase de arrefecimento e chegam a valores na gama de 7 a 8 no composto maduro. Se o grau de arejamento não for adequado irão ocorrer condições anaeróbias, o pH cairá para cerca de 4,5 e o processo de compostagem será retardado (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

◆ Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE) quantifica o teor de sais solúveis e tende a diminuir com ao decorrer da compostagem. A presença em excesso de sais solúveis pode ser fitotóxico devido a alguns sais solúveis, nomeadamente de sódio e cloreto, que podem ser prejudiciais para algumas plantas; outros problemas podem surgir da utilização de compostos com altos teores de condutividade, tais como inibição de atividade biológica e problemas de aplicação no solo. Em contrapartida, valores baixos de condutividade podem representar um défice na quantidade de minerais disponíveis. A incorporação de compostos orgânicos mal maturados no solo aumentam a concentração de sais no solo e a sua CE devido à salinidade do composto. Assim, o conhecimento da CE do composto permite contribuir para a avaliação da utilização do composto mais compatível com as características do solo a que se destina (Brito, 2005).

◆ Odor e cor

As variáveis odor e cor constituem igualmente bons indicadores da forma como o processo se desenvolve. A maioria dos problemas de odor em processos de compostagem aeróbia estão associados ao desenvolvimento de condições anaeróbias no interior da pilha de compostagem, consequência da ocorrência de deficiências a nível do arejamento, libertando-se cheiros pútridos, sulfídricos, ou acéticos (Oliveira *et al.*, 2009; Christensen, 2011).

Em muitos sistemas de compostagem aeróbia em grande escala, é comum encontrar pedaços de revistas ou livros, plásticos (especialmente filmes plásticos), ou materiais semelhantes no material orgânico a ser compostado. Estes materiais normalmente não podem ser decompostos num período de tempo relativamente curto em pilha de compostagem, para além de que por vezes o oxigénio disponível nos centros de compostagem não é suficiente, podendo desenvolver-se condições anaeróbias. Sob estas condições, podem ser produzidos ácidos orgânicos, muitos dos quais são extremamente odoríferos. Para minimizar os potenciais problemas de odores, é importante reduzir o tamanho das partículas, remover plásticos e outros materiais não biodegradáveis a partir do material orgânico a ser fermentado, através de uma boa triagem da matéria-prima (Oliveira *et al.*, 2009; Christensen, 2011).

À medida que o processo evolui, os odores desagradáveis provocados pela decomposição da MO vão desaparecendo, passando a dominar o cheiro a terra húmida, turfa ou húmus. A cor da mistura deverá evoluir, de uma forma homogénea, da cor inicial para uma cor castanho escura homogéneo. Quando alguns dos resíduos presentes mantêm a cor original, esse facto indica a

sua reduzida biodegradabilidade, ou a existência de condições desfavoráveis a esse processo (Oliveira *et al.*, 2009; Christensen, 2011).

2.6.4. Avaliação da estabilidade/maturação do composto

Laboratorialmente é possível acompanhar o processo de compostagem e avaliar o seu desempenho. O grau de decomposição do composto é determinado através de algumas análises como o Teste de Fitotoxicidade, a análise aos organismos patogénicos e o Teste de Auto-aquecimento, que vão ser descritos seguidamente.

◆ Teste de Fitotoxicidade

Segundo Soares (2005), o Teste de Fitotoxicidade pretende ser um indicador da ausência ou presença de substâncias fitotóxicas, incluindo ácidos gordos voláteis, álcoois, sais solúveis, metais pesados ou amónia. Qualquer uma destas substâncias pode causar problemas de atraso na germinação de sementes, danificação da planta ou até mesmo morte. Este teste não pretende identificar especificamente qual ou quais as substâncias inibidoras, mas sim fornecer uma informação de aceitabilidade geral do composto para utilização (Soares, 2005). Quando avaliado em conjunto com os resultados do Teste de *Dewar*, ou Teste de Auto-aquecimento, o Teste de Fitotoxicidade é o parâmetro indicador do grau de maturação do composto final.

Zucconi *et al.* (1985) refere que o período de produção de toxinas é menor em processos com arejamento forçado, quando comparados com aqueles em que o arejamento é realizado apenas por revolvimento da biomassa. Refere ainda que, nos processos com arejamento forçado, a toxicidade das biomassas é eliminada antes do final da fase termófila e que, independentemente do modo de arejamento, a composição dos substratos também afeta a produção de substâncias fitotóxicas.

◆ Organismos Patogénicos

A análise aos organismos patogénicos relaciona o grau de higienização com a avaliação da eficiência do processo de compostagem. A presença de *Salmonella* e/ou outros microrganismos patogénicos num composto final revela uma deficiente estabilização do composto orgânico e é um indicador de fator de risco para a saúde animal, vegetal e humana e consequente falta de qualidade (Soares, 2005).

◆ Teste de Auto-aquecimento

A avaliação da estabilidade do composto pode ser feita através da sua produção de calor, indicando a sua atividade biológica e, por isso, indiretamente, o seu grau de decomposição. Um composto estará maduro quando a sua temperatura se mantém mais ou menos constante (dentro dos valores de temperatura estipulados para o grau de maturação) durante um período de tempo estabelecido, relacionando a atividade microbiológica e, consequentemente o grau de transformação dos componentes das biomassas facilmente biodegradáveis (Brito, 2005; Soares, 2005). O cruzamento dos resultados deste teste com os resultados do Teste de Fitotoxicidade traduzem o grau de maturação do composto (Soares, 2005). Segundo o *“Methods Book for the Analysis of Compost”* (2003), deve haver uma correção do TH do composto para 35%, onde a atividade microbiana é limitada, e só depois se poderá medir corretamente a produção de calor.

2.7. Composto

O composto é o produto do processo de compostagem e a definição empregue por mais autores é: *“o composto é o produto compostado, estabilizado e higienizado, que é benéfico para a produção vegetal”* (Christensen, 2011). O composto é uma fonte rica de matéria orgânica, desempenhando esta um papel importante para manter a fertilidade do solo, e, consequentemente, a produção agrícola sustentável (Misra *et al.*, 2003). Segundo o Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho, composto ou compostado é *“o produto higienizado e estabilizado, resultante da decomposição da matéria orgânica por compostagem, cujas características são de molde a beneficiar, direta ou indiretamente, o crescimento das plantas”*.

A aplicação do composto no solo irá permitir melhorar as suas propriedades físico-químicas e biológicas, ou seja, (Oliveira *et al.*, 2009): (a) manter ou aumentar as reservas de húmus no solo, necessárias à manutenção ou à melhoria das propriedades do solo, em especial no que se refere à sua estrutura, capacidade de troca catiónica e à sua capacidade de conservação da humidade; (b) facilitar o fornecimento às plantas de taxas adequadas de nutrientes, quer macro quer micro nutrientes essenciais; (d) limitar as necessidades de adição de fertilizantes comerciais; (e) reduzir o potencial poluidor associado às atividades agrícolas nomeadamente no que se refere às possibilidades de lixiviação de azoto e outros nutrientes solúveis e, (f) reduzir o teor de substâncias que podem ser arrastadas por lixiviação pela água de rega ou pelas precipitações, poluindo os lençóis freáticos. Contudo, quando a proveniência do composto é da recolha

indiferenciada de RU, levanta alguns problemas, no que diz respeito a elevados teores de metais pesados (Oliveira *et al.*, 2009).

2.7.1. Qualidade do composto

O controlo de qualidade do composto final, assim como o controlo e monitorização de todo o processo de tratamento são aspetos essenciais a considerar numa estação de valorização orgânica (Levy & Cabeças, 2006). Relativamente à qualidade do composto final, esta varia consoante a proveniência e características da matéria-prima e condições de realização do processo de compostagem, pelo que o controlo se inicia na fase de pré-processamento. Assim sendo, a qualidade do produto final é garantida pelo cumprimento de determinados critérios, cuja avaliação se faz através de parâmetros adequados, para os quais se estabelecem valores limites que visam garantir a estabilidade química, a higienização e uma adequada composição do composto (Levy & Cabeças, 2006; Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Feitas estas considerações, pode-se dizer que, no final do processo de compostagem deve-se obter um composto com características físicas, químicas e biológicas que permitam a sua aplicação como elemento estruturante e enriquecedor dos solos em nutrientes e substâncias orgânicas. Em termos físicos, o composto deve apresentar um aspeto de terra escura, de granulometria fina, deve estar livre de partículas sólidas inertes, apresentar textura não áspera e deve ainda estar isento de odores nauseabundos – indicadores de MO ainda em decomposição. O composto deve apresentar valores adequados de densidade, humidade, capacidade de retenção de água e pH neutro a ligeiramente alcalino (Levy & Cabeças, 2006).

Os parâmetros de qualidade aos quais deverá obedecer um determinado composto não foram ainda definidos a nível da Comissão Europeia, embora alguns países já possuam normas publicadas a nível nacional. O objetivo assumido é o de vir a ser aprovada uma norma comunitária, visando a certificação do composto, que seja comercializado acompanhado de especificações, que garantam a sua origem, composição e estado de estabilização (Oliveira *et al.*, 2009).

Em Portugal, após uma proposta de Norma Técnica, em 2005, foi elaborada em 2008 uma proposta para as Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto (Cordeiro, 2010). Esta proposta teve em conta o 2nd Draft do Documento de Trabalho sobre o Tratamento Biológico de Resíduos Biodegradáveis (DG-ENV. A.2, 2001), de Fevereiro de 2001, e o Documento de Trabalho sobre Lamas e Resíduos Biológicos (DG-ENV. A.2/LM, 2003), de

Dezembro de 2003. Neste contexto, com base nas concentrações em metais pesados, materiais inertes antropogénicos, pedras e microrganismos patogénicos no composto, estabelecem-se três classes de qualidade: Classe I, Classe II e Classe III, admitindo-se uma quarta (Classe IIA), de carácter provisório, até a próxima revisão do referido documento.

O mesmo documento refere que a comercialização de composto devidamente higienizado será garantida pela ausência no mesmo de *Salmonella spp.* em 25 g de matéria fresca, bem como pela fixação de um limite máximo admissível no número mais provável (NMP) de 1000 NMP/g do microrganismos *Escherichia coli*, indicador de contaminação fecal. Na proposta para as Especificações Técnicas é ainda referido que o composto deve apresentar um TH inferior a 40%; em relação à granulometria, 99% do material deverá passar por um crivo (de malha quadrada) de 25 mm; o teor de MO do composto para uso generalizado na agricultura, reportado ao peso seco, deverá ser superior a 30%; e relativamente ao pH este deverá situar-se entre 5,5 e 8,5.

Neste âmbito, entrou em vigor em Portugal o Decreto-Lei n.º103/2015, de 15 de junho, relativo aos valores limites para colocação no mercado das matérias fertilizantes. Até ao aparecimento desta legislação, as estações de compostagem nacionais, recorriam a normas de outros países da Comunidade Europeia.

2.7.2. Requisitos legais

♦ Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho

Neste tópico vão ser abordados os requisitos legais para o produto da compostagem proveniente da recolha indiferenciada, seguida de triagem (manual e mecânica) de RU e por fim tratamento biológico da fração orgânica.

Assim sendo, analisando o Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho, do ponto de vista do composto proveniente da recolha indiferenciada de RU, no **ANEXO I - Grupo 5**, verifica-se que este tipo de composto é o **N.º 1 – Corretivo Composto**, que é um corretivo orgânico, “*corretivo agrícola de origem vegetal, ou de origem vegetal e animal, utilizado principalmente com o objetivo de aumentar o nível de matéria orgânica no solo*” (Capítulo I, Artigo 3.º), como se pode verificar na **Tabela 5**.

Tabela 5: Tipos de matérias fertilizantes não harmonizadas: Grupo 5- Corretivos orgânicos.

(Fonte: Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho)

N.º	Denominação do tipo	Indicações relativas ao processo de obtenção e aos componentes essenciais	Teores mínimos de elementos e/ou substâncias úteis. Outras indicações.	Outras indicações relativas à denominação do tipo.	Elementos ou substâncias úteis cujo teor deve ser declarado. Outros critérios.
1	Corretivo Composto.	Produto obtido mediante processo controlado de transformação e estabilização de resíduos orgânicos, que constam no anexo IV.	Corretivo composto com os requisitos constantes no anexo II.	Composto Orgânico. Compostado.	1 — Matérias-primas; 2 — Humidade; 3 — pH; 4 — Condutividade elétrica; 5 — Massa volumica aparente; 6 — Matéria orgânica; 7 — Azoto (N) total; 8 — Fósforo (P2O5) total; 9 — Potássio (K2O) total; 10 — Cálcio (CaO) total; 11 — Magnésio (MgO) total; 12 — Relação C/N; 13 — Boro (B) total; 14 — Cádmiu (Cd) total; 15 — Chumbo (Pb) total; 16 — Cobre (Cu) total; 17 — Crómio (Cr) total; 18 — Mercúrio (Hg) total; 19 — Níquel (Ni) total; 20 — Zinco (Zn) total; 21 — Grau de maturação; 22 — Granulometria; 23 — Materiais inertes antropogénicos; 24 — <i>Salmonella spp.</i> ; 25 — <i>Escherichia coli.</i> ; 26 — Sementes e propágulos de infestantes.
2	Corretivos resultantes do substrato utilizado na produção de cogumelos.	Produto resultante do substrato utilizado na produção de cogumelos em câmara com atmosfera controlada.	Corretivo resultante do substrato utilizado na produção de cogumelos com os requisitos constantes no anexo II.		
3	Vermicomposto.	Produto estabilizado obtido essencialmente a partir da digestão de materiais orgânicos por minhocas, em condições controladas.	Corretivo obtido essencialmente a partir da digestão de materiais orgânicos por minhocas com os requisitos constantes no anexo II.		

Esta designação de composto tem de obedecer a requisitos adicionais aplicáveis (teores mínimos de elementos e/ou substâncias úteis; outras indicações) às matérias fertilizantes obtidas a partir de resíduos e outros componentes pertencentes no Grupo 5 que se encontram no ANEXO II. No **ANEXO II - Quadro n.º 7**, encontram-se as utilizações do composto por classe de matéria fertilizante, como se pode confirmar na **Tabela 6**, pelo que para o composto em estudo a classe correspondente é a **Classe IIA**.

Tabela 6: Utilização da matéria fertilizante de acordo com a classe.

(Fonte: Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho)

Classe de matéria fertilizante	Utilização
Classes I e II	Agricultura.
Classe IIA	Culturas agrícolas arbóreas e arbustivos nomeadamente pomares, olivais e vinhas. Espécies silvícolas.
Classe III	<ul style="list-style-type: none"> - Solo onde não se pretenda implantar culturas destinadas à alimentação humana e animal; - Cobertura final de aterros e lixeiras, pedreiras e minas, tendo em vista a restauração da paisagem; - Cobertura de valas e taludes, no caso da construção de estradas (integração paisagística); - Fertilização de solos destinados à silvicultura (espécies cujo fruto não se utilize na alimentação humana ou animal); - Culturas bioenergéticas; - Jardinagem; produção florícola (excluem-se as culturas edíveis); - Campos de futebol e de golfe.

A matéria fertilizante proveniente de um composto do tipo IIA tem como aplicações “culturas agrícolas arbóreas e arbustivas nomeadamente pomares, olivais e vinhas. Espécies silvícolas.” Sendo que “as quantidades a aplicar estão dependentes não só das características do solo mas também da matéria fertilizante, devendo obedecer à legislação em vigor no que respeita aos limites de aplicação de nutrientes, em particular do azoto. Os solos que receberem matérias fertilizantes devem ser sempre analisados antes da sua aplicação” (Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho).

De forma a ter um produto higienizado, as unidades de compostagem devem submeter, durante o período de tempo apropriado, os resíduos em condições de temperatura e humidade capazes de inativar os microrganismos patogénicos e as sementes e propágulos de infestantes (Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho, ANEXO II, ponto 14):

1- Sistema em que o tratamento biológico dos resíduos é realizado integralmente por compostagem:

- a) Nos sistemas de pilha estática com arejamento forçado, em que a pilha de resíduos não é revolvida e se encontra coberta com uma camada de material utilizado como isolador térmico, submetendo -se a massa em compostagem a arejamento através de insuflação

ou sucção, toda a massa de resíduos deve permanecer pelo menos duas semanas a uma temperatura mínima de 60°C e a um grau de humidade superior a 40%;

- b) Nos sistemas de pilha revolvida em que se procede a revolvimentos periódicos da massa em compostagem, podendo ou não haver arejamento forçado, os resíduos devem estar submetidos durante, pelo menos, quatro semanas a condições de temperatura e humidade superiores a 55°C e 40%, respetivamente, efetuando -se, no mínimo, três revolvimentos;
- c) Nos sistemas em que a primeira fase do processo de compostagem (termófila) ocorre em reatores aeróbios, no interior dos quais as condições ambientais são controladas, toda a massa de resíduos contida nos mesmos deve manter -se o tempo necessário para que a fase de higienização (pasteurização) decorra de forma efetiva e eficiente, garantindo -se uma temperatura de pelo menos 60°C, de forma a assegurar a destruição dos microrganismos fecais e o teor de humidade deve manter -se a valores superiores a 40%.

2- Nos sistemas em que o tratamento biológico dos resíduos sólidos é efetuado por digestão anaeróbia, seguida necessariamente, de um período de compostagem do digerido para efeitos de maturação:

- a) O tempo médio de retenção dos resíduos no digestor anaeróbio deve ultrapassar os 20 dias, a temperaturas superiores a 53°C;
- b) Se as condições de temperatura e tempo de permanência dos resíduos nos digestores não obedecerem às especificações atrás referidas, deve em alternativa:
 - i. O digerido ser submetido a posterior compostagem onde se mantenha, pelo menos duas semanas a temperaturas superiores a 55°C, efetuando -se, no mínimo, dois revolvimentos, ou uma semana a temperaturas superiores a 60°C, no caso da pilha estática arejada com arejamento forçado;
 - ii. Os resíduos serem sujeitos à temperatura de 70°C durante uma hora, antes de serem introduzidos nos reatores anaeróbios.

Ainda no ANEXO II, encontram-se os requisitos analíticos aplicáveis a fertilizantes e outros componentes orgânicos, mais comuns, inseridos no Grupo 5. Na **Tabela 7** e na **Tabela 8**, encontram-se, alguns desses, requisitos dirigidos à classe de composto IIA.

Tabela 7: Requisitos aplicáveis às matérias fertilizantes obtidas a partir de resíduos.

(Fonte: Adaptado de Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho, ANEXO II)

N.º	Parâmetro	Requisito / Valor Máximo Admissível (VMA)
1	Matéria Orgânica	As matérias fertilizantes constituídas, total ou parcialmente por resíduos orgânicos, devem conter um teor mínimo de 30% de matéria orgânica (reportado à matéria seca).
2	Humidade	O teor máximo de humidade, expresso em percentagem em massa, permitido na matéria fertilizante é de 40%, sem prejuízo do disposto no n.º 5 do artigo 36º.
3	Granulometria	De um modo geral, 99% do material que constitui a matéria fertilizante deve passar por um crivo de malha quadrada de 25 mm.
4	pH	O pH da matéria fertilizante deve situar-se entre 5,5 e 9,0.
5	Fitotoxicidade	A matéria fertilizante de origem orgânica é considerada não fitotóxica desde que o índice resultado da sua submissão a um dos testes de fitotoxicidade do anexo V ao presente diploma revele ausência de fitotoxicidade.
6	<i>Salmonella spp.</i>	Ausente numa amostra de 25 g de matéria fertilizante produzida.
	<i>Escherichia coli</i> .	<1000 células/g de matéria fertilizante produzida.
	Sementes e propágulos de infestantes.	3 unidades ativas/Litro.
7	Valores máximos admissíveis para os teores «totais» de metais pesados na matéria fertilizante com componentes orgânicos (miligramas por quilogramas de matéria seca).	
	Cádmio (Cd)	3
	Chumbo (Pb)	300
	Cobre (Cu)	400
	Crómio (Cr)	300
	Mercúrio (Hg)	3
	Níquel (Ni)	200
	Zinco (Zn)	1000
8	Valores máximos admissíveis para os teores «totais» de materiais inertes antropogénicos (incluem vidro, metais e plásticos, cujas partículas apresentam uma granulometria superior a 2mm), pedras de granulometria superior a 5 mm (valores repostados à matéria seca), na matéria fertilizante com componentes orgânicos RU.	
	Materiais inertes antropogénicos (%)	2,0
	Pedras > 5mm (%)	5,0

O grau de maturação da matéria fertilizante é constituído por três categorias, cada uma delas associada a uma temperatura, ou a um intervalo de temperaturas, como se pode verificar na **Tabela 8.**

Tabela 8: Categorias de matéria fertilizante em função do grau de maturação.

(Fonte: Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho, ANEXO II)

Temperaturas atingidas no teste de auto-aquecimento em vasos de <i>Dewar</i> (T°C)	Grau de Maturação	Categoria da matéria fertilizante
T < 40	IV e V	Maturada
40 < T < 50	III	Semimaturada
T > 50	I e II	Fesca

De modo a cumprir os valores limites do composto têm de ser efetuados métodos de amostragem e de análise que se encontram no **ANEXO V – Quadro n.º 1**. *“As análises a efetuar às matérias fertilizantes do Grupo 5 devem completar os seguintes parâmetros”*:

- Agronómicos: humidade, matéria orgânica, carbono total, massa volúmica aparente, pH, condutividade elétrica, azoto total, fósforo «total», potássio «total», cálcio «total», magnésio «total», boro «total», razão carbono total/azoto total;
- Metais pesados: cádmio, crómio, cobre, níquel, chumbo, mercúrio e zinco «total»;
- Microbiológicos: *Salmonella* spp. *Escherichia coli*;
- Grau de maturação (teste de auto-aquecimento) e Fitotoxicidade;
- Materiais inertes antropogénicos e pedras;
- Sementes e propágulos de infestantes.

Os métodos de referência de amostragem e de análise a efetuar às matérias fertilizantes constantes no ANEXO V, para o Grupo 5 – Corretivos orgânicos, podem ser consultadas no **Anexo A** do presente documento.

Aquando da aplicação do corretivo orgânico no solo, deve-se analisar o solo em questão, de forma a perceber as carências e as quantidades a aplicar. Deve-se obedecer à legislação em vigor no que respeita aos limites da aplicação de nutrientes, em particular de azoto.

3. Metodologia

Neste tópico vai começar por ser enquadrada a empresa acolhedora, a origem da matéria-prima, bem como a infraestrutura onde foi realizado o estudo de caso. Assim sendo, a ERSUC, Resíduos Sólidos do Centro, S.A., tem como missão adotar soluções adequadas de tratamento e valorização dos RU produzidos no Litoral Centro, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região e do país e para maximização do bem-estar humano através da criação de valor. A ERSUC pertence ao Grupo Empresa Geral do Fomento, S.A. (EGF) que é responsável por assegurar a gestão e o tratamento e valorização de RU em Portugal, servindo cerca 60% da população de Portugal, o que corresponde a 6,4 milhões de habitantes (EGF, 2015). No **Apêndice A** encontra-se mais informação relativa ao Grupo EGF, S.A.

A ERSUC é uma empresa de capitais públicos, com um capital social de 8 500 000 euros, distribuídos pela EGF, S.A, na percentagem de 51% e os restantes 49% distribuídos pelos Municípios da sua área de ação. A ERSUC surge no âmbito do Decreto-Lei n.º 166/96, de 5 de Setembro, que cria o Sistema Multimunicipal de Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos do Litoral Centro (SMTVRSU do Litoral Centro). Este integra 36 Municípios (12,9 % do Continente) abrangendo uma área que se aproxima dos 7000 Km² (7,9%), servindo uma população de cerca de 1 milhão de habitantes (10% da população nacional) e trata cerca de 430 000 toneladas de resíduos por ano (Santos, 2013; ERSUC, 2013).

Em 2012, a ERSUC concluiu dois Centros Integrados de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (CITVRSU), nas freguesias de Eirol e Vil de Matos, concelhos de Aveiro e Coimbra, respetivamente. Os CITVRSU são dotados de: (a) unidade de TMB para tratamento dos resíduos urbanos indiferenciados; (b) unidade de valorização energética do biogás produzido na unidade TMB; (c) unidade de preparação de CDR para tratamento da fração com poder calorífico da unidade TMB; (d) unidade de triagem automatizada para tratamento de resíduos recicláveis provenientes da recolha seletiva; (e) ecocentro; (f) aterro sanitário de apoio e, (g) ETAR (Santos, 2013). Os municípios abrangidos pelos CITVRSU de Aveiro e Coimbra estão representados na **Figura 4**, a verde e a azul, respetivamente.

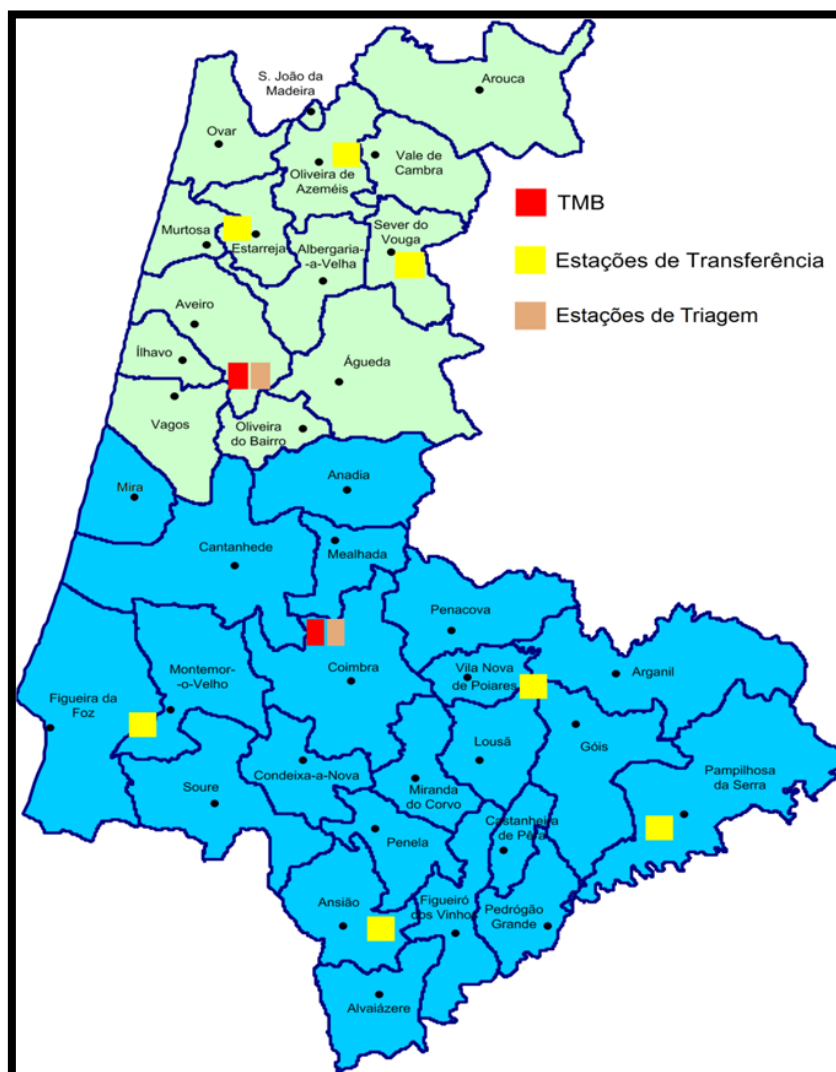


Figura 4: Municípios abrangidos pela ERSUC – Litoral Centro.

(Fonte: ERSUC, 2013)

O estudo de caso foi realizado na unidade TMB do CITVRSU-Coimbra (ver **Figura 5**), a qual trata e valoriza os resíduos provenientes dos municípios de Alvaiázere, Anadia, Ansião, Arganil, Cantanhede, Coimbra, Castanheira de Pera, Condeixa-a-Nova, Figueira da Foz, Figueiró dos Vinhos, Góis, Lousã, Mealhada, Mira, Miranda do Corvo, Montemor-o-Velho, Pampilhosa da Serra, Penacova, Penela, Pedrogão Grande, Soure e Vila Nova de Poiares.

Nos tópicos seguintes vão ser descritos o funcionamento da unidade de TMB e a metodologia utilizada para o estudo de caso, bem como as variáveis a otimizar.

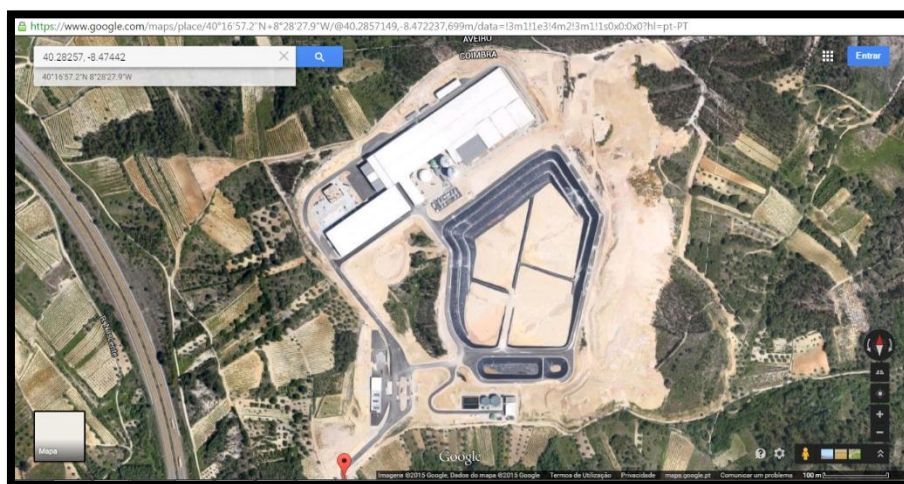


Figura 5: ERSUC, CITVRSU-Coimbra, Vil de Matos.

(Fonte: Google Maps, 2015)

3.1. Funcionamento da unidade de TMB

3.1.1. Matéria-prima: entrada de resíduos

O CITVRSU funciona das 00:00 horas de Segunda-feira às 24.00 horas de Domingo e admite os seguintes resíduos na unidade de TMB: resíduos urbanos, resíduos equiparados a urbanos (REU) e resíduos urbanos biodegradáveis (ERSUC, 2012).

O controlo da entrada de resíduos no CITVRSU processa-se da seguinte forma; a viatura de transporte de resíduos à chegada dirige-se à portaria para que o Segurança verifique os documentos necessários para posteriormente se proceda à pesagem, através de uma báscula (balança destinada a objetos pesados, com plataforma horizontal) ligada a um sistema informático que faz o registo das quantidades de resíduos entrados. No sistema informático são registados os pesos, bem como a respetiva proveniência e tipologia de resíduos declarados. Tratando-se um produtor não autorizado e/ou o código da Lista Europeia de Resíduos (LER) não estiver conforme, a carga é recusada neste tipo de CITVRSU (ERSUC, 2012):

Uma vez controlada a sua entrada é feita a pesagem e a viatura dirige-se para a zona de descarga de resíduos indicados pelo Segurança. A zona de descarga dos resíduos é constituída exclusivamente por 6 portões amarelos (ver **Figura 6**), sendo a descarga apenas efetuada num dos portões com semáforo de admissão verde ligado. A descarga/receção é efetuada de acordo com as normas de segurança da ERSUC-CITVRSU, através de um sistema de dupla porta que garante o confinamento dos odores no seu interior, sendo os RU depositados em fossas.

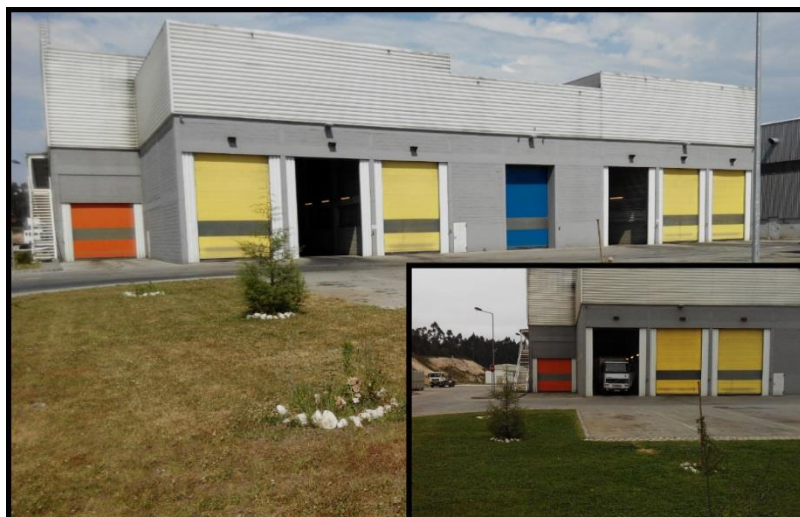


Figura 6: Zona de descarga de resíduos (RU, REU, RUB).

Após a descarga as viaturas dirigem-se novamente à portaria e passam obrigatoriamente pela báscula de pesagem.

3.1.2. Pré-seleção dos resíduos urbanos

Após a receção dos RU nas fossas, as garras montadas em pontes rolantes, encaminham os mesmos para o TM. Neste, processam-se múltiplas operações unitárias através de pontes rolantes que dividem os resíduos nos seguintes fluxos: recicláveis (cartão, plásticos, metais ferrosos e não ferrosos), MO, CDR e refugos que seguem para o aterro sanitário (ERSUC, 2013).

A fração de RU superior a 400 mm é processada por triagem manual em cabines. A fração de RU inferior a 400 mm segue para operações, totalmente automáticas, que comportam a crivagem dos RU, abertura de sacos, separação balística, separação de ferrosos, separação de alumínio, separação por infravermelhos, e seguem posteriormente para preparação de suspensão orgânica. Os recicláveis são encaminhados para a indústria recicladora e a MO é transformada em suspensão aquosa, posteriormente afinada, através de equipamentos de depuração onde são retiradas as impurezas (areia, vidro, pedras e outros) e segue para o tratamento biológico na central. Os refugos são encaminhados para o aterro sanitário de apoio (Santos, 2013). A **Figura 7** representa um resumo do descrito acima, sob a forma de diagrama de blocos do tratamento mecânico.

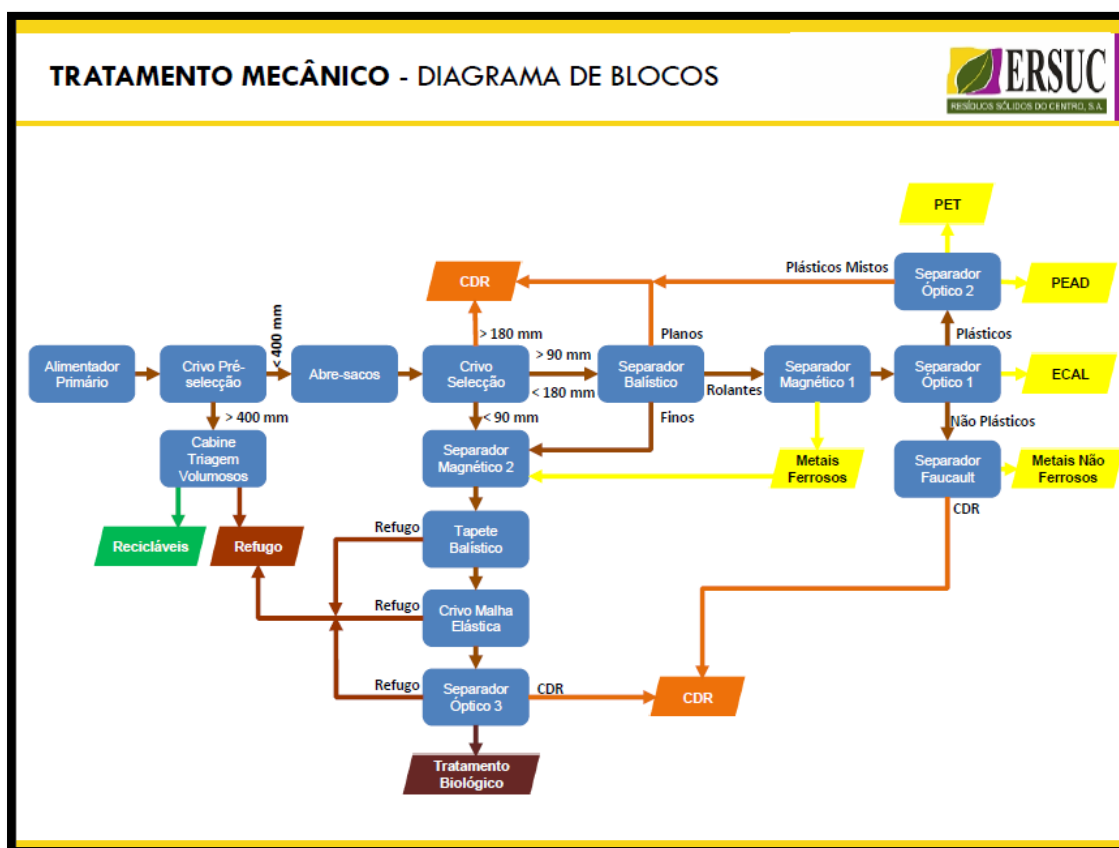


Figura 7: Diagrama de Blocos do Tratamento Mecânico.

(Fonte: SIG ERSUC, 2014)

3.1.3. Tratamento da matéria orgânica

A fração orgânica da pré-selecção do tratamento mecânico é alimentada através de um tapete de pesagem para um distribuidor com formato em “Y”, designado por distribuidor carga *pulper*, que está ligado a dois *pulpers* (um ativo e outro de reserva, ambos com capacidade de 20 m³, e operam continuamente) onde é intensamente triturada e misturada com água de processo.

A matéria orgânica pré-tratada é parcialmente dissolvida e mantida em suspensão, enquanto o material sólido pesado (fração de pesados), com pedras, vidro, areia, plásticos de alta densidade, etc. são removidos por sedimentação a partir do fundo de cada *pulper* através de sem-fins de extração e são direcionados para o tapete transportador de rejeitados. A fração de leves flutuantes é removida através de crivagem. O restante material em suspensão está em condições de ser bombeado. A descarga do *pulper* é efetuada através de uma descarga livre para o crivo rotativo húmido.

3.1.3.1. Separação e armazenamento da suspensão

◆ Crivo rotativo húmido

O crivo rotativo húmido retém as partículas da suspensão com um diâmetro (\emptyset , definido) > 20 mm sendo estas encaminhadas para um sem-fim de descarga de crivo rotativo e pelo tapete transportador de rejeitados. O líquido (com partículas \emptyset < 20 mm) atravessa os orifícios do crivo.

Na primeira metade do crivo, o líquido existente flui diretamente para o desarenador, por ação das placas-guia que estão instaladas no interior do crivo rotativo húmido, numa disposição em espiral. Na segunda metade do mesmo, existe um sistema de pulverização e de aspersores que recolhe o líquido nesta zona e que segue para o tanque de recolha do crivo rotativo.

◆ Desarenador

A suspensão que fluiu através do desarenador segue para o sistema de arejamento (efetuado através do compressor de ar que proporciona um fluxo rotativo). Neste, o material inerte, como a areia e a gravilha, é recolhido pelo sem-fim horizontal de pesados do desarenador (instalado no fundo do desarenador e funciona continuamente no movimento para jusante).

O desarenador também está equipado com um sem-fim de flutuantes (colocado no topo do desarenador) que retira plásticos, madeira, espumas e outros materiais flutuante e transporta-os para um recipiente de rejeitados, através de tapetes transportadores, tal como o material inerte.

No final do desarenador, o material orgânico (já livre da maior parte das impurezas) é mantido em suspensão e flui para o tanque de carga das bombas do desarenador. A suspensão, continuamente agitada, é bombeada para o tanque pulmão através das bombas distribuidoras controladas por frequência (uma a funcionar, uma em espera). Tanto no início, como no final, o desarenador tem como auxílio dois hidrociclones que limpam a suspensão que irá ser encaminhada para a fase seguinte.

◆ Tanque pulmão

O tanque pulmão é utilizado para garantir o carregamento contínuo dos digestores. Para evitar que ocorra uma possível fase de separação, o reservatório é continuamente agitado com um agitador central. A descarga do reservatório é efetuada pelas bombas de carga do digestor. Cada uma das bombas está equipada com um conversor de frequência e um moinho triturador. O fluxo de alimentação é controlado pelos instrumentos de medição de fluxo instalados.

3.1.4. Digestão da matéria orgânica

A suspensão da MO é bombeada para os Digestores (D1 e D2) ambos com uma capacidade de 5000 m³, onde é fermentada num passo único à temperatura mesofílica (30-40°C, rondando normalmente os 35°C, permitindo o crescimento ideal das bactérias envolvidas na degradação da MO). Neste passo ocorre a digestão anaeróbia, desencadeando-se as reações químicas e biológicas que levam à produção de um gás com elevado potencial calorífico, o biogás.

A mistura nos digestores é efetuada pelo biogás comprimido, *i.e.*, uma parte do fluxo de biogás produzido é comprimido por dois compressores (um por digestor) e novamente injetado na suspensão da fermentação através de tubos separados por digestor. A própria suspensão dos digestores é ainda sujeita a recirculação. Os digestores são descarregados pelas bombas de descarga do digestor e a água da suspensão digerida é de seguida eliminada. As bombas estão equipadas com conversores de frequência e com instrumentos de medição de fluxo (um em bypass para centrífuga de reserva). A MO permanece nos digestores por 2 semanas.

◆ Compressão, análise, armazenamento e queima de biogás

O biogás produzido na digestão anaeróbia é encaminhado para uma linha de dessulfuração e posteriormente para o seu aproveitamento energético em motogeradores. O biogás dessulfurizado flui, de seguida, para o gasómetro de baixa pressão (reservatório de gás de dupla membrana com um volume de 3080 m³, uma pressão operacional de 22 mbar e um sistema de medição contínuo do nível de enchimento). O biogás tratado é utilizado nas instalações da ERSUC, S.A. e o excedente é disponibilizado para a produção de eletricidade, através da sua injeção na rede elétrica nacional e de calor através de unidade de cogeração.

◆ Desidratação

A separação de sólidos-líquidos da suspensão é efetuada através de três centrífugas, estando duas a funcionar e uma como máquina de reserva. A suspensão é continuamente separada em duas fases através de um campo centrífugo no qual são alcançadas velocidades de sedimentação elevadas.

O material sólido remanescente da desidratação, designado industrialmente de sólidos da centrífuga (digestato sólido – MO já digerida) é conduzido pelo sem-fim de descarga da centrífuga para a tolva de lamas na área de compostagem. A água de processo, designada de líquido das centrífugas, é de seguida conduzida para o tanque de água de processo, passando primeiro pelo filtro, sendo reutilizada no processo.

3.1.5. Túneis de compostagem

♦ Caracterização dos túneis de compostagem

A ERSUC usufrui de 8 túneis de compostagem (ver **Figura 8**), cada um com 5 m de altura, 5 m de largura e 25 m de comprimento e constituídos por: (a) revestimento de betão; (b) o piso de cada um dos túneis é formado por 192 lajes de cimento perfurado, com 8 aberturas cada, para permitir o arejamento do material que está sujeito ao processo de compostagem; (c) lajes perfuradas que recolhem os lixiviados não filtrados; (d) 2 sondas que medem a temperatura e oxigénio (que só são colocadas quando os túneis estão prontos a iniciar o processo de compostagem). As sondas têm uma altura de 4,50 m mas devido à espessura da cobertura do túnel é descontado 35 cm da altura total, logo a altura real das sondas nos túneis é 4,15 m. Assim sendo, a sonda só mede a temperatura e O_2 da pilha, a partir dos 0,85 cm do piso e, (e) 1 ventilador, bem como 3 válvulas motorizadas que usam os sinais da temperatura e do O_2 para controlar ativamente a quantidade de ar fresco e de ar recirculado de que cada túnel necessita.



Figura 8: Túneis de compostagem (1 - túneis de compostagem; 2 - ventilador; 3 - lajes de cimento perfuradas, com 8 aberturas cada).

◆ Preparação do substrato

Os sólidos das centrífugas provenientes da zona de desidratação são recolhido na tolva de lamas (designação interna) e conduzidos através dos sem-fins helicoidais para a plataforma misturadora. Com o auxílio de uma pá carregadora, o material estruturante (aparas de madeira) de acácia (*Acacia Australis*) é colocado no alimentador de estruturantes que segue ao longo do tapete de material estruturante para a plataforma misturadora, onde é misturado com os sólidos de centrífuga (ver **Figura 9**). Por forma a controlar melhor a mistura, um conversor de frequência controla a velocidade do alimentador e, consequentemente, o volume de estruturante (E) e sólidos de centrífuga adicionados à plataforma misturadora. Nesta fase o operador controla do rácio estruturante: sólido das centrífugas (rácio E:SC), que pretende contabilizar, através do número de pás de estruturante e de sólidos de centrífugas colocadas na plataforma misturadora.



Figura 9: Preparação da mistura (rácio estruturante: sólidos de centrífuga), (1 - tolva de lamas e sem-fins helicoidais que transporta os sólidos de centrífuga para a plataforma misturadora; 2 - plataforma misturadora; 3 - tapete de material estruturante; 4 - material estruturante (estilha de acácia); 5 e 6 substrato orgânico preparado).

O substrato orgânico preparado é empilhado nos túneis de compostagem com pás carregadoras a alturas pré definidas. Antes de arrancar um túnel, deve-se comprovar que o carregamento é feito de forma homogénea, com altura de carregamento o mais constante possível. No carregamento, o operador da máquina carregadora deve ter o cuidado de não golpear as paredes ou o teto dos túneis. Depois do túnel estar completo, são introduzidas as 2 sondas que medem a temperatura e oxigénio. Seguidamente, a porta é fechada e o programa de “pré-compostagem” inicia-se. Nesta fase, as condições dentro do túnel são monitorizadas através do *software SCADA*.

3.1.6. Compostagem em túnel (pré-compostagem)

O programa “compostagem em túnel” controla os túneis de compostagem através do *software SCADA* e funciona à base de receitas seguidas por dois passos, sendo que cada passo tem condições para que o próximo inicie. A verificação da temperatura é utilizada como fator predominante para mudança de passo. O controlo da mesma é feito através da leitura de temperatura das 2 sondas por túnel no *SCADA*. O operador poderá escolher se a leitura de temperatura é feita de uma ou mais sondas e se a temperatura utilizada será a mínima, média, máxima ou de uma leitura pontual. A leitura do teor de oxigénio é processada do mesmo modo que a leitura da temperatura.

Os lixiviados dos túneis escorrem através das lajes perfuradas e são recolhidos no tanque de lixiviados não filtrados. Após a filtragem no filtro rotativo de lixiviados, é temporariamente armazenado no tanque de lixiviados filtrados. A humedificação de cada um dos túneis é definida por um temporizador. Se um túnel precisar de água, as bombas de irrigação de lixiviados transportam os lixiviados de volta através de aspersores, espalhando água pela superfície da pilha de composto. No caso de nenhum túnel necessitar de água e do nível de enchimento do recipiente para lixiviados filtrados for elevado, os lixiviados em excesso são bombeados para a ETAR.

Os túneis são alimentados com ar proveniente da sala de ar de saída recolhido, e tratado num lavador de ar e biofiltro. A água em excesso do purificador e do biofiltro é conduzida para a ETAR. Cada túnel pode funcionar com uma receita independente, sendo que cada uma tem um tempo total para que acabe. Esse tempo é utilizado para calcular o tempo de compostagem. Os passos do programa “pré-compostagem” são:

◆ Passo 1 - Esterilização/Higienização

O O_2 mínimo neste passo é muito baixo, por volta dos 5%. A atividade microbiológica aquece o ar, enquanto a temperatura e o O_2 são monitorizados. Neste passo é pretendido que a mistura atinga a temperatura de esterilização/higienização, sendo o ideal atingir nas duas sondas temperaturas de 70°C durante 2h (compostagem normal), ou temperaturas $\geq 55^\circ\text{C}$ e $\leq 70^\circ\text{C}$ durante 5 dias (compostagem forçada I). Caso as temperaturas não atinjam os valores referidos, nas duas sondas, o processo de compostagem é forçado (compostagem forçada II, temperaturas próximas de 55°C). Posto isto, o programa passa ao seguinte passo: Compostagem.

◆ Passo 2 - Compostagem

No processo de compostagem a temperatura diminui para temperaturas inferiores ao Passo 1 (normalmente $<55^\circ\text{C}$). O programa controla constantemente a temperatura e o O_2 durante a compostagem. Neste passo o oxigénio mínimo é mantido geralmente nos 10%.

De modo a otimizar a pilha de maturação (pilha revolvida), o tempo de compostagem dentro do túnel é gerido consoante as necessidades. Isto é, depende do tempo de funcionamento de centrífugas (se as centrífugas não estiverem a funcionar, o material em túnel mesmo que já se encontre pré-compostado pode permanecer nele mais tempo, sem influência no produto de compostagem; se as centrífugas estiverem com muita produção e o túnel já tiver passado à fase de compostagem, assim que as temperaturas estiverem abaixo dos 55°C, o túnel pode ser descarregado).

Aquando da retirada do pré-composto, a porta do túnel deve ser aberta devagar e com cuidado e o operador tem de se certificar que a temperatura do túnel é baixa. Antes de descarregar o túnel com uma pá carregadora, o operador tem de confirmar se as sondas foram retiradas limpas. No fim da descarga, tem de limpar o túnel, em especial o pavimento (lajes) e as boquilhas de irrigação depois de cada receita.

3.1.7. Maturação e afinação

O pré-composto, proveniente dos túneis, é transferido com uma pá carregadora para uma pilha de compostagem trapezoide - meseta de compostagem, onde permanece durante aproximadamente 10 semanas. Durante a maturação, o material de compostagem não é ventilado ativamente. O O_2 é maioritariamente trazido para o material através do revolvimento periódico levado a cabo pela volteadora de composto (ver **Figura 10**).

Decorridas as 10 semanas, o composto maturado é empilhado em pequenos montes na zona da afinação (ver **Figura 10**), sendo então transportado para o sistema de afinação (ver **Figura 11**). Uma pá carregadora carrega o material no alimentador de composto a velocidade variável, que transporta o material para um tapete e, por fim, para um crivo de malha elástica.



Figura 10: Composto maturado (1 - pilha de compostagem trapezoide; 2 - pilha revolvida pela volteadora de composto; 3 - composto maturado para seguir para afinação).

As partículas de tamanho excessivo são recirculadas como se fossem material estruturante (ver **Figura 12**) e serão misturadas com os sólidos de centrífuga, para que a compostagem possa continuar e a gestão dos recursos seja o mais eficiente possível; o fluxo de fundo é conduzido por um tapete transportador e depois para uma mesa densimétrica. Na mesa densimétrica, o ar é soprado a partir de baixo, isto enquanto uma placa perfurada vibra.

O material pesado (que não é elevado pelo ar - fibras plásticas, vidros e outros inertes que não foram possíveis de retirar nas operações anteriores) é transportado ao longo da placa perfurada vibratória para a saída de material pesado. Depois de passar por uma série de tapetes transportadores, este material nomeado de refugo (ver **Figura 12**) é encaminhado para aterro sanitário.



Figura 11: Sistema de Afinação (1 - panorama do sistema de afinação; 2 - pá carregadora carrega o material no alimentador de composto; 3 - tapete que transporta o material para o crivo de malha elástica; 4 - tapete que transporta o material já sem o estruturante para uma mesa densimétrica; 5 - saída de refugo; 6 – hidrociclone).

O composto afinado (CA) é elevado com a ajuda do ventilador e, devido à gravidade, sai da máquina através da saída de leves. O pó e a poeira saem da máquina pela parte de cima e entram num ciclone, onde são recolhidos. A saída de leves e o pó recuperado caem no mesmo transportador e são empilhado no solo.



Figura 12: Resultado do sistema de afinação (1 - estruturante recirculado; 2 - refugo; 3 - composto final).

O composto afinado (final) fica então pronto para poder ser utilizado em diversas aplicações de enriquecimento de solos. Este fica armazenado até ao escoamento do seu *stock* (ver **Figura 13**).



Figura 13: Composto afinado (1 - composto final após afinação; 2 - armazenamento do composto final (em stock)).

A **Figura 14** representa um resumo do descrito nos tópicos acima, sob a forma de diagrama de blocos do tratamento biológico.

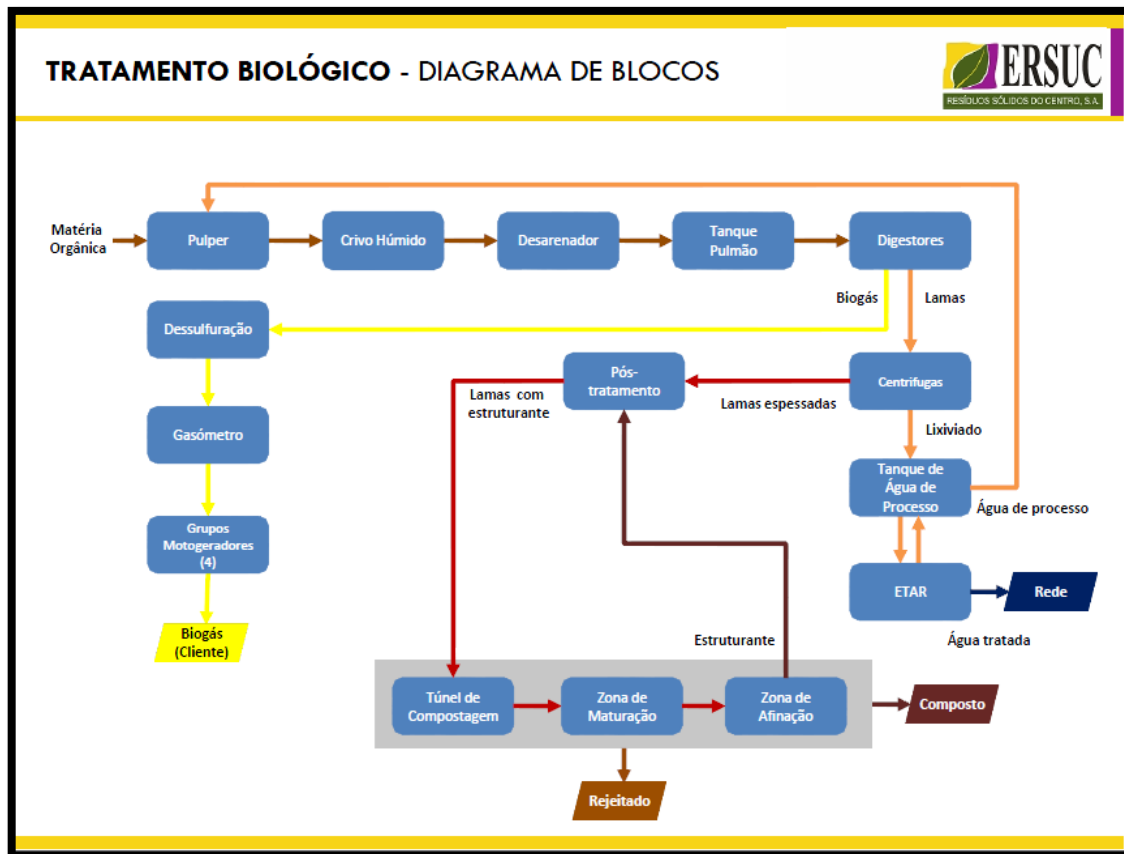


Figura 14: Diagrama de Blocos do Tratamento Biológico.

(Fonte: SIG ERSUC, 2014)

3.1.8. SCADA

O *Supervisory Control and Data Acquisition* (Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados) abreviado de SCADA (também denominado de *software* supervisor), é um *software* usado para automatizar e/ou monitorar, supervisionar variáveis e dispositivos de controlo dos processos industriais, em vários mercados, conectados através de controladores (*drivers*) específicos onde são utilizados os dados operacionais em tempo real para tomar decisões (ver Figura 15). Este permite (SCADA, 2015): (a) monitorar, reunir e gravar num arquivo os dados de processo e (b) soluções de visualização de dados HMI (Interface Homem-Máquina) / SCADA (interagir e controlar em tempo real máquinas e dispositivos como válvulas, bombas, motores, e muito mais), dando aos operadores acesso aos dados operacionais em tempo real e de forma gráfica, o que lhes permite monitorizar e controlar os processos a partir de um local centralizado remotamente.

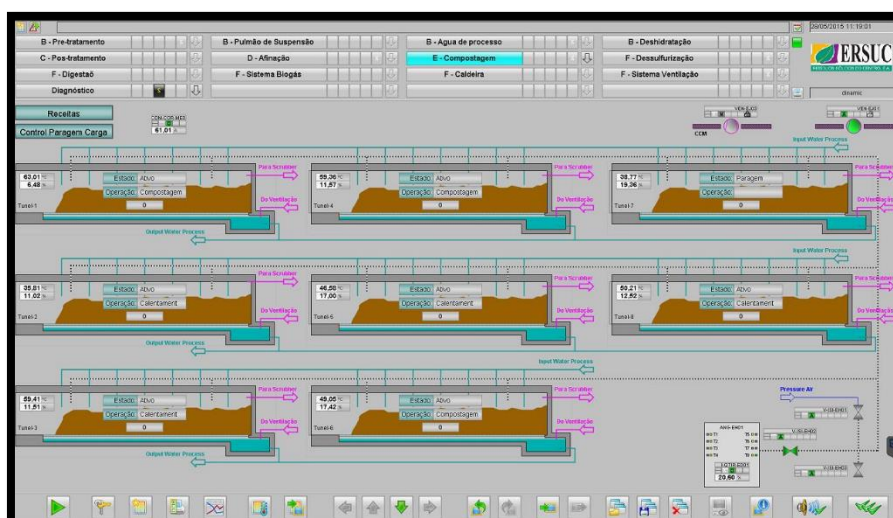


Figura 15: Visualização dos túneis de compostagem através do *software* SCADA.

Este *software* tem inúmeras vantagens das quais se destacam (SCADA, 2015): (a) fácil uso, implementação, configuração e manutenção simplificada; (b) alta segurança em nível de dados embutidos no sistema e disponibilidade, permitindo o acesso a dados históricos e criação de relatórios; (c) implementação do aplicativo remoto de monitorização, permitindo a visualização HMI e SCADA geograficamente distribuídos e (d) definição fácil e flexível de alarme.

3.2. Procedimentos experimentais

3.2.1. Ensaios experimentais em túnel – “receitas”

Durante o período de estudo foram realizados, em túnel de compostagem, 4 ensaios com 4 receitas diferentes, com uma réplica de cada. Na tabela abaixo (ver **Tabela 9**) encontram-se descritos os ensaios experimentais e a explicação para a sua escolha.

Tabela 9: Ensaios Experimentais: Receitas (Rácio E:SC (rácio estruturante: sólidos de centrífuga); altura da pilha (m)).

Receita	A	B	C	D
Rácio E:SC	1:1	2:1		
Altura da pilha (m)	1,50		1,80	2,00
Repetição	1			
Denominação	A; A'	B; B'	C; C'	D; D'

Após uma pesquisa bibliográfica, constatou-se que na literatura havia uma carência de informação relativa a uma altura ótima, ou uma gama de alturas ótimas, para o sistema de compostagem em estudo, túnel reator. Posto isto, a procura da altura ótima foi no sentido do sistema mais parecido com o túnel reator, o sistema de pilhas estáticas arejadas, e numa gama de alturas disponibilizada para sistemas de compostagem em geral. Associada a esta procura de informação foram tidas em consideração as características dos túneis reatores existentes no CITVRSU de Coimbra, nomeadamente as dimensões dos túneis, e a altura mínima que as sondas de temperatura e oxigénio medem.

A altura mínima que as sondas medem é de 0,85 m, embora na literatura se referia que uma altura mínima da pilha de 0,80 m deve ser respeitada, uma altura mínima com esse valor não fazia sentido, porque a sonda não ia atingir a altura média da pilha, e as medições de temperatura e O_2 não iriam ser fiáveis, pelo que a altura mínima escolhida foi 1,50 m. No ensaio com altura mais baixa, foram testados diferentes rácios E:SC (1:1 e 2:1) para ver se há diferenças no tempo de permanência do material em túnel. A altura máxima que se poderia definir não poderia passar dos 3,00 m, uma vez que essa altura fica muito próxima do ventilador, podendo causar problemas a nível de arejamento no túnel, nomeadamente a nível da recirculação de ar. Outro motivo é referido na literatura que diz que alturas demasiado altas, entre 2,50 e 3,00 m, podem tornar-se demasiado quentes e matar os microrganismos responsáveis pela compostagem e podem ficar muito compactas diminuindo o arejamento no seu interior.

Até a este ponto, já foram impostos os limites mínimos e máximos que se devem ser utilizados para pilhas de compostagem, 1,50 e 2,50 respetivamente. Pelo que para o sistema de compostagem em túnel reator as alturas ideias são entre 2,00 a 2,50 m. Assim sendo, de forma a ter um conhecimento do funcionamento dos túneis de compostagem na ERSUC, e como só há possibilidade de efetuar quatro ensaios com uma réplica cada, vão começar por ser ensaiadas (**Tabela 9**) as alturas mais baixas, 1,50 m com variação de rácio, 1,80 m e a maior altura 2,00 m, como se encontra ilustrado na **Figura 16**. A altura da pilha de compostagem em cada ensaio foi medida, antes e após a saída de túnel para confirmar se a pilha abateu, ou seja se houve uma diminuição significativa da altura inicial da pilha.



Figura 16: Ensaaios em túnel de compostagem, com receitas diferentes (1 - receita A; 2 - receita B; 3 - receita C; 4 - receita D).

O tempo de permanência da matéria em túnel de compostagem, na fase de esterilização, esperava-se que fosse de 7 a 49 dias. Refere-se na fase de esterilização, porque a fase seguinte, compostagem, de onde resulta o pré-composto, só é findada e o material compostado transferido para a pilha de maturação consoante as necessidades, ou seja, dependendo do funcionamento de centrífugas. Assim sendo, para termos de contabilização do tempo de permanência do material em túnel associado à altura ótima é contabilizado o tempo de esterilização, em dias.

3.2.2. Metodologia do trabalho desenvolvido

Durante o período de estudo foi acompanhado todo o processo de compostagem, desde a caracterização física da matéria-prima (caracterização à entrada de *pulper* (CEP)), sólidos de centrífuga, preparação da mistura (rácio E:SC), entrada e saída de túnel reator, pilha de maturação, composto afinado e estruturante recirculado. As análises laboratórias efetuadas, durante o período de estudo, estão descritas no tópico seguinte.

A recolha de amostras sólidas foi feita da forma mais eficaz possível e em recipientes limpos e constituídos por materiais inertes, protegidos das condições atmosféricas, consoante procedimento interno. As amostras foram analisadas com a maior brevidade possível, de modo a que os resultados fossem o mais próximo da realidade. Na **Tabela 10** encontra-se a calendarização das análises físico-químicas que foram efetuadas durante o período de estudo.

De realçar que durante o decorrer do estudo houve a possibilidade de efetuar análises físico-química no Laboratório de Solos e Fertilidades da ESAC, para os seguintes parâmetros: carbono orgânico, carbono total, azoto total (N_t) e relação carbono/azoto.

Tabela 10: Calendarização das análises efetuadas.

Análises / Unidades	Pontos de amostragem							
	Entrada de <i>pulper</i>	Sólidos de centrífuga	Entrada de túnel	Em túnel	Saída de túnel	Composto maturado	Composto afinado	Estruturante recirculado
Caracterização física da matéria orgânica (%)	x							
Sólidos totais (%)	x	x	x		x	x	x	
Teor de humidade (%)	x	x	x		x	x	x	
Sólidos voláteis (%)	x	x	x		x	x	x	
Matéria orgânica (% m.s.)	x	x	x		x	x	x	
Carbono orgânico (% m.s.)		x	x			x		
Carbono total (% m.s.)		x	x			x		
Azoto total (% m.s.)		x	x			x		
Relação carbono: azoto		x	x			x		
Massa volúmica (g/L)		x	x		x		x	x
pH								
Condutividade elétrica (mS.cm ⁻¹)			x		x		x	
Temperatura (°C)				x				
Teor de oxigénio (%)				x				
Granulometria (%)								x
Teste de auto-aquecimento - Teste de <i>Rottegrad</i> (nível)							x	
Periodicidade	Mensal	Bissemanal	Enchimento do túnel (3 amostras)	Diária	Esvaziamento do túnel (3 amostras)	Semanal	Mensal; Semanal	Mensal; Semanal
Observações							(*)	(**)
Notas: (*) Teste de Auto-aquecimento teve uma periodicidade semanal, os restantes parâmetros mensal; (**) massa volúmica teve uma periodicidade mensal e a granulometria semanal.								

3.2.3. Análises físico-químicas

♦ Caracterização física da matéria orgânica à entrada de *pulper*

Uma das análises físico-químicas fundamentais para o estudo foi a caracterização física da MO à entrada de *pulper*. Esta análise permitiu conhecer a composição da matéria que entrou no tratamento biológico após sucedidas operações anteriormente descritas (pré-seleção dos RU e tratamento da MO), reflete a constituição da MO e, por conseguinte, a origem do composto final aplicado aos solos. Esta caracterização foi efetuada após a colheita de uma amostra composta (várias amostras recolhidas ao longo de uma manhã, com posterior homogeneização).

Após a colheita de ≈ 2000 g da amostra sólida, retirou-se uma porção da amostra total recolhida para determinar sólidos totais (ST), teor de humidade, sólidos voláteis e matéria orgânica. Pesou-se a restante amostra e registou-se a massa exata (M_{total}), seguida de uma crivagem com um crivo de 20 mm.

Pesou-se a Fração $x < 20$ mm, registou-se a massa ($M_{\text{fração}}$) e determinaram-se ST, TH, SV e MO. Para a Fração $x > 20$ mm fez-se o mesmo procedimento e procedeu-se à separação dos constituintes da amostra nas frações referidas na **Tabela 11** e demonstradas na **Figura 17**.

Tabela 11: Frações da caracterização e respetivos constituintes.

ID da fração	Fração	Componentes
F1	Madeira	Madeira
F2	Plástico	Plásticos
F3	Metal	Metais
F4	Orgânico de cozinha	Carne, peixe, vegetais e frutas
F5	Orgânico de jardim	Todos os constituintes provenientes de jardim (por ex. folhas, caules, flores)
F6	Orgânico indiferenciado	Ossos, espinhas, rolhas de cortiça
F7	Papel	Papel e cartão
F8	Vidro/Pedra	Vidros e pedras
F9	Outros	Todos os componentes que não se enquadrem numa das outras categorias (por ex. têxteis, rolhas de plástico, esferovite, etc.)



Figura 17: Caracterização física da matéria orgânica à entrada de *pulper* (1 - saco de transporte da amostra para o laboratório; 2 - amostra a caracterizar; 3 - peneiro de malha 20 mm; 4 - fração <20 mm; 5 - madeira; 6 - metal; 7 - orgânico de cozinha; 8 - orgânico indiferenciado; 9 - orgânico de jardim; 10 - outros; 11 - papel; 12 - vidro e pedra).

Pesaram-se cada uma das frações, registaram-se as massas ($M_{\text{fração}}$) e calculou-se a percentagem correspondente de cada uma das frações, segundo a **Equação 1**. Os resultados foram expressos em %.

$$\% \text{ Fração } (Fi) = \frac{M_{Fi}}{M_{\text{total}}} \times 100$$

Equação 1: Percentagem de cada fração da caracterização (em que: % Fração (F_i) - fração de constituinte da caracterização expressa em %; M_{Fi} - massa de cada uma das frações, em g; M_{total} = massa da amostra total, em g).

◆ Sólidos totais

Após o tratamento do cadinho na estufa a 105°C durante 2 horas, deixou-se a arrefecer até peso constante no exsicador e registou-se a sua massa (P_0) na balança analítica. Seguidamente, para a determinação de sólidos totais segundo Clesceri, Greenberg & Eaton (1999), homogeneizou-

se a amostra (através de agitação manual no recipiente de recolha) e transferiu-se uma porção da amostra homogeneizada para o cadinho de porcelana, pesando-o com a amostra fresca na balança analítica e registou-se a massa (P_1). Colocou-se o cadinho na estufa a uma temperatura de 105°C durante 24 horas. Decorrido esse tempo, deixou-se o cadinho com a amostra seca a secar no exsiccador até peso constante, e registou-se a massa (P_2). Os cálculos de ST foram feitos conforme a **Equação 2**, e a apresentação dos resultados foi em % de base tal qual (b.t.q).

$$ST(\%) = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \times 100$$

Equação 2: Cálculo dos sólidos totais (em que: ST (%) - sólidos totais expressos em %; P_0 - massa do cadinho, em g; P_1 - massa do cadinho + amostra fresca, em g; P_2 - massa do cadinho + amostra seca, em g).

◆ Teor de humidade

A amostra era constituída por sólidos totais e pelo teor de humidade. Assim sendo, após a determinação dos ST, o teor de humidade foi calculado através da **Equação 3**, e a apresentação dos resultados foi em % de b.t.q. (Clesceri, Greenberg, & Eaton, 1999).

$$TH (\%) = 100\% - ST (\%)$$

Equação 3: Cálculo do teor de humidade (em que: TH - teor de humidade expresso em %; ST - sólidos totais, em %).

◆ Sólidos voláteis

Os ST dividem-se em SV e cinzas inertes (matéria residual mineral resultante da destruição da MO por incineração (ignição) controlada.) que são tidas como perda de massa por ignição, em percentagem de amostra seca. Pelo que para determinar os SV, após a pesagem do cadinho seco em estufa (P_2), colocou-se o cadinho com a amostra seca na mufla, a 550°C durante 2 horas. Após o tempo programado de calcinação, quando a temperatura no interior da mufla atingia os ≈70°C colocavam-se os cadinhos no exsiccador e deixaram-se arrefecer até peso constante. Pesaram-se os cadinhos com a amostra calcinada e registaram-se as massas (P_3). Com esta informação procedeu-se ao cálculo dos sólidos voláteis conforme **Equação 4** (Clesceri, Greenberg, & Eaton, 1999). A apresentação dos resultados foi em % de b.t.q..

$$SV (\%) = \frac{(P_2 - P_0) - (P_3 - P_0)}{(P_1 - P_0)} \times 100$$

Equação 4: Cálculo dos sólidos voláteis (em que: SV (%) - sólidos voláteis expressos em %; P₀ - massa do cadinho (g); P₁ - massa do cadinho + amostra fresca (g); P₂ - massa do cadinho + amostras seca (g); P₃ - massa do cadinho + amostra calcinada (g)).

♦ Matéria orgânica

A MO é a fração de carbono presente numa amostra que é livre de água e substâncias inorgânicas. Para este efeito, a MO foi tida como equivalente às perdas por incineração. O teor de MO, expresso em % de matéria seca (m.s.), foi determinada de acordo com a **Equação 5**.

$$MO(\% \text{ m. s.}) = \frac{SV (\%)}{ST (\%)} \times 100$$

Equação 5: Cálculo da matéria orgânica (em que: MO (%) - matéria orgânica expressa em % m.s.; ST - sólidos totais, em %; SV - sólidos voláteis, em %).

♦ Carbono orgânico

A preparação da amostra foi de acordo com a Norma Europeia (EN) 13040:1999, secagem a 75°C, e a moenda e crivagem com crivo de 500 µm de acordo com a EN 13650:2001. Após este ultimo passo, a amostra foi seca 105°C, de acordo com a EN 13039:1999, para posteriormente se proceder à determinação do teor de carbono.

O teor de carbono orgânico foi determinado por oxidação a 590°C e deteção por infravermelhos próximos. Para a determinação do C_{org}, pesou-se uma quantidade de amostra seca, entre 0,2 e 0,3 g, para uma barquinha de combustão e registou-se o peso. Seguidamente cobriu-se a amostra com óxido de alumínio de forma a controlar a velocidade de combustão (LECO®, 1997).

Após ligar o equipamento (“forno”) e ter-se esperado que atingisse os 590°C, abriu-se o *software* associado ao analisador, e inseriu-se na tabela predestinada o peso da amostra (através da seleção da janela “F3-Add Sample”). De seguida, carregou-se na função “F4-Analyze” e seguiu-se as instruções do *software*. Depois destas indicações introduziram-se as barquinhas de combustão no analisador LECO®. Após indicação do *software*, associado ao analisador, que a determinação do teor de carbono estava concluída, e retiraram-se as barquinhas (LECO®, 1997)

A quantificação do teor de carbono orgânico presente na amostra foi efetuada diretamente através do *software* associado ao analisador, através da integração da área, em percentagem (ver **Figura 18**). Os resultados foram expressos em % m.s..

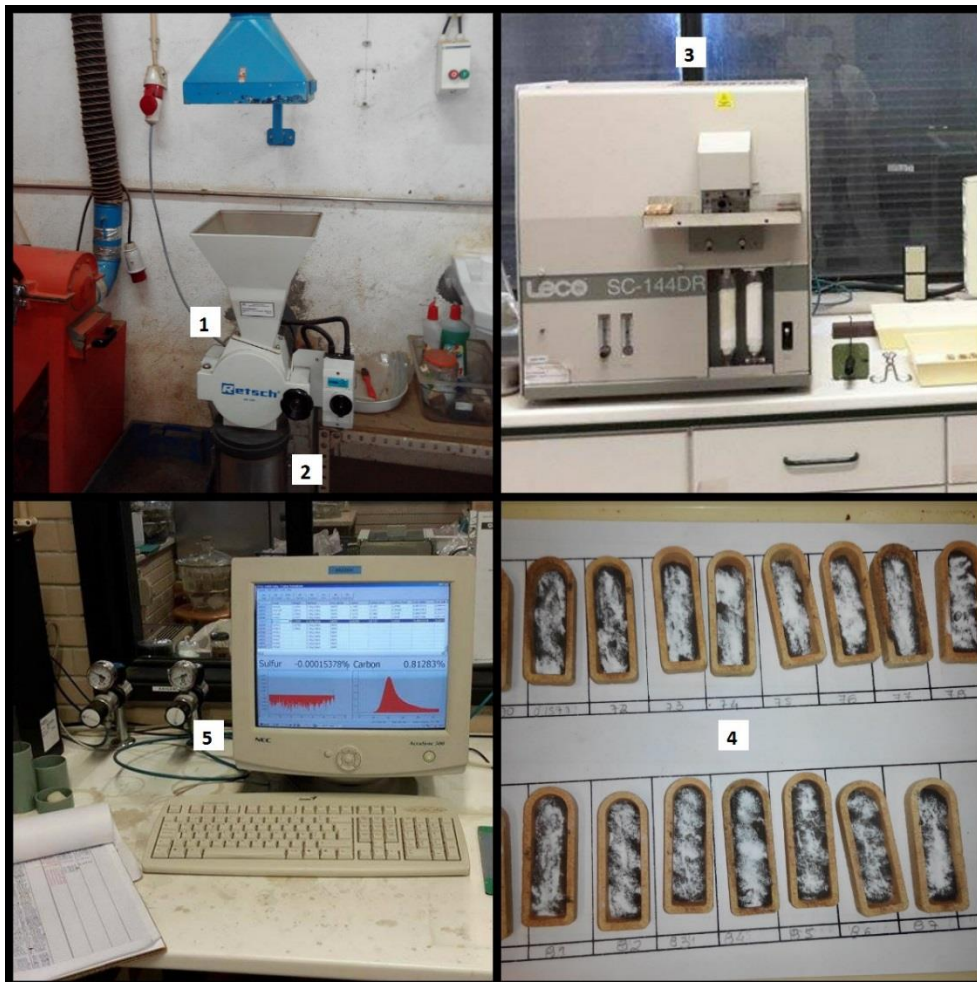


Figura 18: Determinação do carbono orgânico (1 - moenda e a crivagem com crivo de 500 µm; 2 - recipiente que recolhe a amostra moída e crivada; 3 - analisador LECO® (forno) 4 - barquinhas de combustão, com amostra, cobertas com óxido de alumínio; 5 - *software* associado ao analisador LECO®).

♦ Carbono total

O teor de C_t foi determinado por oxidação a 1350°C e deteção por infravermelhos próximos (LECO®, 1997). A metodologia foi exatamente a mesma da determinação do $C_{org.}$, excetuando a temperatura de oxidação que foi de 1350°C. Os resultados foram expressos em % de m.s..

◆ Azoto total

A preparação da amostra foi, com o mesmo método do carbono, de acordo com a EN 13040:1999, secagem a 75°C, e a moenda e crivagem com crivo de 500 µm de acordo com a EN 13650:2001.

A determinação de azoto total foi feita pelo método de Kjeldahl. Para a determinação do N_t , pesaram-se $\pm 2,5$ g da amostra seca e colocaram-se no tubo de digestão. Adicionaram-se 4 ml de mistura catalítica (constituída por 90 g de sulfato ferroso, 20 g de sulfato de cobre anidro e 500 g de sulfato de potássio) e 10 ml de ácido sulfúrico concentrado. Os tubos de Kjeldahl (com o respetivo suporte) foram colocados no sistema de digestão a 400°C durante 2 horas. Decorrido esse tempo, deixaram-se os tubos a arrefecer até atingirem a temperatura ambiente, para se proceder à destilação. Foi feito um ensaio em branco (os passos foram exatamente iguais ao já referido mas omitindo a presença de amostras) (Bremner, 1979; ISO 3696:1987; Póvoas, & Barral, 1992).

Seguidamente os tubos de Kjeldahl e os *erlenmeyers* (com capacidade de 300 ml) contendo 20 ml de solução de ácido bórico a 2%, foram colocados nos respetivos lugares da unidade de destilação. A destilação foi efetuada em modo de funcionamento automático, adicionando o sistema 100 ml de água desmineralizada a 50 ml de hidróxido de sódio concentrado a 40% e, verificou-se de seguida a ebulição do conteúdo do tubo e a passagem do vapor de água pelo sistema. Foram recolhidos nos *erlenmeyers* com cerca de 150 ml de destilado (passando a cor do ácido bórico a 2% de rosa para verde) (Bremner, 1979; ISO 3696:1987; Póvoas, & Barral, 1992).

A titulação do amoníaco fixado pela solução de ácido bórico foi feita com uma solução aferida de ácido clorídrico, passando a cor verde a rosa (ver **Figura 19**). Foi utilizado como referência da titulação uma solução com 25 ml de ácido bórico a 2%, com um volume de água destilada equivalente ao volume recolhido de destilado. O teor de azoto foi expresso em % de m.s. e foi obtido pela **Equação 6** (Bremner, 1979; ISO 3696:1987; Póvoas, & Barral, 1992).

$$N(\%) = \frac{[HCL] \times (V_{amostra} - V_{branco}) \times 0,014 \times 100}{m_{amostra}}$$

Equação 6: Determinação do teor de azoto a 75° C (em que: N (%) - teor de azoto expresso em %; [HCL] - normalidade da solução de ácido clorídrico; $V_{amostra}$ - volume de HCL gasto na titulação da amostra, em ml; V_{branco} - volume de HCL gasto na titulação do branco, em ml; $m_{amostra}$ - massa da amostra seca a 65°C, em g; 0,014 - valor (g) de N que reage com 1 ml de HCL 1 mol dm⁻³).



Figura 19: Determinação do azoto total (1 - tubos de Kjeldahl; 2 - sistema de digestão; 3 - solução de ácido bórico a 2%; 4 - tubos de Kjeldahl com amostra digerida; 5 - unidade de destilação; 6 - *erlenmeyer* contendo 20 ml de solução de ácido bórico a 2%; 7 - *erlenmeyer* com a amostra destilada; 8 - amostra destilada).

Após a determinação do teor de azoto da amostra preparada (com secagem a 75°C segundo a EN 13040:1999 e moenda e crivagem com crivo de 500 µm de acordo com a EN 13650:2001) este foi convertido para transformar o N_t em matéria seca a 105°C (tal como a MO , C_{org} , C_t), recorrendo à **Equação 7** (EN 13040:1999):

$$N (\% \text{ m. s.}) = \frac{N_{75^\circ\text{C}} (\%) \times 100}{100 - TH (\%)}$$

Equação 7: Determinação do teor de azoto em percentagem de massa seca (em que: $N (\% \text{ m. s.})$ - teor de azoto expresso em % m/m_{seca}; $N_{75^\circ\text{C}}$ - teor de azoto calculado na equação 6; TH – teor de humidade (%)).

♦ Relação carbono/azoto

A relação C/N foi determinada através da **Equação 8**.

$$\text{Relação C:N} = \frac{\% \text{ Carbono orgânico}}{\% \text{ Azoto total}}$$

Equação 8: Relação C/N.

◆ Determinação da massa volúmica

Para determinação da massa volúmica (ρ), primeiramente recolheu-se uma amostra sólida e de seguida fez-se a sua homogeneização. Posto isto, utilizou-se um *gobelé*, enchendo-o com água até transbordar, registou-se a massa obtida (P_1) e rejeitou-se a água de seguida. Com o mesmo *gobelé*, perfez-se o mesmo volume com a amostra e registou-se a massa obtida (P_2). A massa volúmica da amostra foi calculada através da **Equação 9**, expressa em g/L.

$$\rho = \frac{P_2}{P_1}$$

Equação 9: Determinação da massa volúmica da amostra (em que: ρ - massa volúmica da amostra expressa em g/L; P_1 - volume da massa do *gobelé* com água, em L; P_2 - massa do *gobelé* com amostra, em g).

◆ pH e condutividade elétrica

No laboratório do CITVRSU de Coimbra não existia nenhum protocolo laboratorial referente à determinação do pH e da condutividade elétrica em amostras sólidas. Assim sendo, foi redigido um protocolo referente a esses dois parâmetros e posto em prática após a aprovação dos responsáveis do laboratório (consultar **Apêndice B**). A determinação do pH e da condutividade elétrica foi realizada de acordo com a EN 13037:1999 e a EN 13038:1999, respetivamente.

Primeiramente peneirou-se a amostra sólida num crivo de malha de 20 mm. Para a determinação do pH segundo a referida Norma Europeia, usaram-se 60 ml da amostra peneirada e 300 ml de água desionizada, numa mistura em *gobelé* que se agitou em placa de agitação *gobelé* com um agitador magnético, durante 1 hora a uma temperatura de $22^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$. Após a leitura do pH, com medidor e eletrodo de medição de pH, centrifugou-se o estrato a 5000 rpm (rotações por minutos) durante 4 minutos, e procedeu-se à leitura da condutividade elétrica. Os resultados foram expressos em ms.cm^{-1} (EN 13037:1999; EN 13038:1999).

◆ Temperatura e oxigénio

A temperatura e a concentração de oxigénio do processo de compostagem em túnel foram registados através do *software SCADA*, consultando os valores, médios, medidos por cada sonda fixa e específica para o efeito. Os resultados da temperatura foram expressos em $^\circ\text{C}$ e os do oxigénio em %.

♦ Granulometria

Esta análise laboratorial já era realizada no laboratório do CITVRSU de Coimbra, mas ainda não existia nenhum documento escrito para seguir a metodologia. Pelo que, foi redigido o protocolo laboratorial e aprovado pelos responsáveis do laboratório (consultar **Apêndice C**). A granulometria foi determinada com base no procedimento descrito no “*Methods Book for the Analysis of Compost*” (2003), com algumas adaptações.

Começou-se por pesar uma certa quantidade de amostra fresca (≈ 2000 g), procedeu-se ao peneiramento desta através de crivos com uma malha sucessivamente mais larga, respetivamente 10 mm e 20 mm. Do material resultante dos 2 crivos, obtiveram-se 3 frações (fração <10 mm; 10 mm $<$ fração <20 mm; fração > 20 mm) como se pode ver na **Figura 20**, das quais foi anotado o peso de cada uma. O resultado final foi expresso em % (Methods Book for the Analysis of Compost, 2003).



Figura 20: Determinação de frações por granulometria (1 - amostra a ser tratada; 2 e 3 crivo de malha 20 mm e 10 mm, respetivamente; 4 - preparação da bancada de trabalho; 5, 6 e 7 fração de fração <10 mm; 10 mm $<$ fração <20 mm e fração > 20 mm, respetivamente).

3.2.4. Avaliação da estabilidade/maturação

♦ Teste de auto-aquecimento: Teste de *Rottegrad*

O teste do auto-aquecimento foi realizado após peneiro da amostra de composto com crivo de malha de 10 mm e correção do TH a 35% de 800 g a 1000 g de amostra, a qual foi colocada num recipiente adiabático (*Dewar flask*) mantido à temperatura ambiente (ver **Figura 21**). Se o TH fosse superior a 35%, a amostra era seca ao ar. Se o TH fosse inferior a 35%, era adicionada água desionizada à amostra, através da determinação da quantidade de água desionizada a adicionar à amostra fresca (consultar **Apêndice D** - Teste de *Rottegrad*: acerto do teor de humidade com água) (Methods Book for the Analysis of Compost, 2003).



Figura 21: Determinação do Teste de *Rottegrad* em vaso de Dewar.

Após a correção do TH, foi colocado um termómetro digital a 2/3 da profundidade total do vaso. O ensaio terminou quando a temperatura máxima foi atingida, começando de seguida a decrescer, acabando por estabilizar. Anotou-se o valor máximo da temperatura atingida, expressa em °C, verificando-se de seguida qual o grau de maturação, de acordo com a temperatura máxima atingida durante o ensaio de auto-aquecimento, com base a classificação do “*Methods Book for the Analysis of Compost*” (2003), como demonstra a **Tabela 12**.

Tabela 12: Grau de maturação do composto de acordo com a temperatura máxima atingida durante o ensaio de auto-aquecimento.

(Fonte: Methods Book for the Analysis of Compost, 2003)

Grau de Maturação	Temperatura máxima (°C)	Designação do produto
I	>60	Pré-composto (material no início do processo de compostagem)
II	50.1-60.0	Composto fresco
III	40.1-50.0	Composto fresco
IV	30.1-40.0	Composto maduro
V	=30	Composto maduro

3.3. Apresentação e análise dos resultados

A metodologia acima descrita foi aplicada consoante o plano pré-definido, tendo como referenciais os procedimentos em vigor e as boas práticas laboratoriais, por forma a minimizar a ocorrência de erros, tornando os resultados obtidos mais fidedignos. Um vez executados os procedimentos e registados os dados, em folhas de registo laboratorial, procedeu-se à sua conversão em resultados, por aplicação das equações matemáticas acima apresentadas, através de folhas de cálculo do *software Microsoft Excel*, previamente construídas. Aos resultados laboratoriais adicionaram-se, em registo, as informações que se consideraram pertinentes, relativas ao processo, por forma a auxiliar e validar a análise crítica de resultados.

Recolhida, registada e organizada a totalidade da informação foi então possível discuti-la e avaliá-la criticamente, constituindo-se daí resultados finais do presente estudo. No tópico abaixo são explanados os resultados obtidos, pela ordem pela qual as amostras são obtidas no processo industrial, arredondada às centésimas (duas casas decimais).

4. Resultados e Discussão

No presente capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos durante o estudo da compostagem no CITVRSU de Coimbra, com destaque para a otimização de variáveis, ou seja, os ensaios realizados em túnel reator. São também apresentados os resultados sobre a caracterização física dos resíduos a compostar, bem como as restantes análises físico-químicas e a avaliação do grau de estabilidade/maturação do composto. Por último, é feita a comparação dos resultados obtidos no composto com a legislação aplicável em vigor.

4.1. Caracterização da matéria-prima para compostagem

4.1.1. Caracterização da entrada de *pulper*

A caracterização mensal, à entrada de *pulper*, permitiu conhecer a matéria-prima utilizada no processo de compostagem, após digestão anaeróbia e separação da fração líquida. A **Tabela 13** apresenta a média das caracterizações efetuadas por categoria (para verificar os resultados na integra consultar o **Apêndice E**). Em média, 42,89% dos resíduos são de categoria inferior a 20 mm, ou seja, é uma fração de resíduos que devido às suas pequenas dimensões é difícil separar por categoria. Dos restantes 57,11%, a maior percentagem corresponde às frações de papel e de orgânico de cozinha, 19,43% e 15,18%, respetivamente. Desses 57,11%, caracterizáveis a “olho nu”, 44,79% corresponde a matéria biodegradável (papel, orgânico cozinha, orgânico jardim, orgânico indiferenciado e madeira). Os restantes 12,31% correspondem às outras categorias.

Tabela 13: Caracterização, média, à entrada de *pulper* por categorias.

Amostra	Categoria	Fração total%
Entrada de <i>pulper</i>	Orgânica cozinha	15,18
	Orgânico jardim	5,24
	Orgânico indiferenciado	4,32
	Madeira	0,62
	Papel	19,43
	Plástico	2,40
	Vidro/Pedra	6,98
	Metal	0,63
	Outros	2,30
	Fração < 20 mm	42,89

Para além da caracterização física, foram realizadas outras análises físico-químicas, as quais são expostas na **Tabela 14**. Em média, a matéria que entra a *pulper* possui 41,62% de ST, 22,44% de SV e ≈54% de MO. O TH é elevado passando ligeiramente os 58%. Um valor de TH nesta gama já era esperado, devido à matéria orgânica ter absorvido líquidos, consequência de uma recolha do tipo indiferenciada.

Tabela 14: Valores médios da fração total da entrada de *pulper* (ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica).

Amostra	Análises físico-químicas			
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)
Fração total da entrada de <i>pulper</i>	41,62	22,44	58,38	53,96

A quantidade de papel caracterizada representou 19,43%, e este devido às suas características absorve água, contribuindo para um elevado TH. No dia-a-dia das populações são utilizados diversos tipos de papel para diversas funções, havendo alguns tipos de papel que ainda não são passíveis de serem reciclados e são depositados como lixo indiferenciado, associado a uma não reciclagem, fazem com que esta categoria apresente uma percentagem significativa.

Estes resultados dizem apenas respeito à fração total da CEP, encontrando-se os resultados obtidos para as fração > 20 mm e para a fração <20 mm no **Apêndice E**.

4.1.2. Análise dos sólidos de centrífuga

Os sólidos de centrífuga, apresentados na **Tabela 15**, contêm em média ≈ 35% de ST e ≈16% de SV. O TH foi, em média, de ≈65 %. De acordo com a literatura, o material a compostar não deveria ultrapassar um TH de 60%. De forma a diminuir o TH para valores ótimos, foi adicionada estilha de madeira (que funciona também como agente de volume) para posteriormente se proceder à compostagem. A MO, em média, rondou os 46% m.s., ou seja, a matéria-prima ainda tem um valor considerável de matéria para degradar, sendo que uma parte já foi degradada nos digestores.

O biogás é um dos produtos resultantes da valorização orgânica que apresenta maior lucro visível para o CITVRSU de Coimbra, pelo que lhe interessa afinar o processo de digestão anaeróbia, para que seja possível degradar maior quantidade de MO. Se este processo for afinado a percentagem de MO à saída dos digestores vai ser menor, de forma a haver maior

produção de biogás. Os valores, em percentage, de SV e MO obtidos não foram mais baixos, porque se encontra em estudo a otimização dos digestores.

Tabela 15: Valores médios dos sólidos de centrífuga (ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; Relação C/N - relação C_{org}/ N_t; ρ - massa volúmica).

Amostra	Análises físico-químicas								
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	C _t (% m.s.)	C _{org} (% m.s.)	N _t (% m.s.)	Relação C/N	ρ (g/L)
Sólidos de centrífuga	34,99	16,05	65,01	45,79	27,84	28,85	1,56	18,56	756,01

O carbono total é constituído por carbono orgânico total e pelo carbono inorgânico, sendo que o C_{org} é superior ao carbono inorgânico porque, a MO é maioritariamente constituída C_{org}. Analisando a **Tabela 15**, em média, o C_t e o C_{org} apresentam quantidades idênticas, 27,84% m.s., e 28,85% m.s., respetivamente, apresentando o C_{org} um valor superior. O C_{org} apresenta uma percentage superior à do C_t, o que não deveria acontecer. Esta situação pode ter ocorrido devido a problemas de recolha de amostra, a amostra conter muito estruturante ou má homogeneização da amostra.

Em média, o N_t apresenta 1,56% m.s., resultando numa relação C_{org}/N_t de 18,56. A massa volúmica, em média, é de 756 g/L. Este valor aumenta ou diminui, consoante a maior ou menor percentage de TH, respetivamente. Pelo que, o sistema de centrifugação de sólidos deveria ser afinado, de forma a eliminar maior quantidade de água de processo. No **Apêndice F** encontram-se a totalidade dos resultados obtidos para as análises físico-químicas realizadas aos sólidos de centrífuga.

4.2. Agente de *bulking*

O agente de *bulking*, estilha de madeira de acácia, é fundamental no processo de compostagem porque promove o arejamento da pilha, através da introdução de porosidade, e absorção de água. De forma a poder ter um melhor conhecimento do estruturante recirculado a nível de absorção do teor de humidade, durante o decorrer do estudo foi feita uma análise pontual ao TH do estruturante novo e do estruturante recirculado para comparação de resultados. Ao estruturante novo foi ainda realizada uma caracterização granulométrica pontual. Apesar da estilha de madeira, quando entregue nas instalações da ERSUC já trazer as indicações do fornecedor por lote comprado, relativamente à massa volúmica, para este parâmetro foi feita

uma análise pontual devido ao facto de estarem já misturados alguns lotes. A massa volúmica determinada foi de ≈ 282 g/L, um valor relativamente baixo, comparativamente à massa volúmica do estruturante recirculado, em média ≈ 558 g/L, cerca de 50% superior. Esta diferença deve-se ao facto de o estruturante já ter sido utilizado e ter cumprido a sua função de introduzir porosidade na pilha de compostagem e de absorver humidade (uma maior humidade conduz a maior peso por volume, *i.e.*, maior densidade). Posto isto, procedeu-se à caracterização granulométrica do estruturante novo (**Figura 22**) e do estruturante recirculado (**Figura 23**).

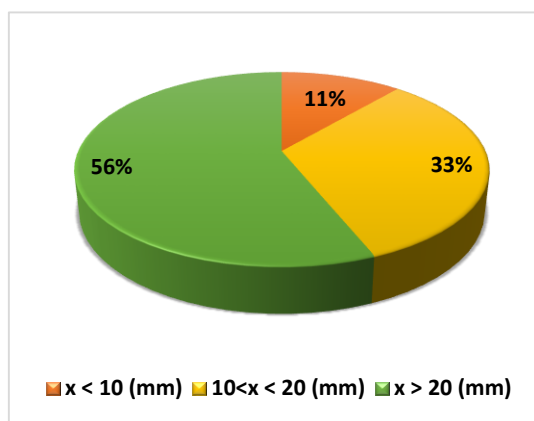


Figura 22: Caracterização pontual do estruturante novo.

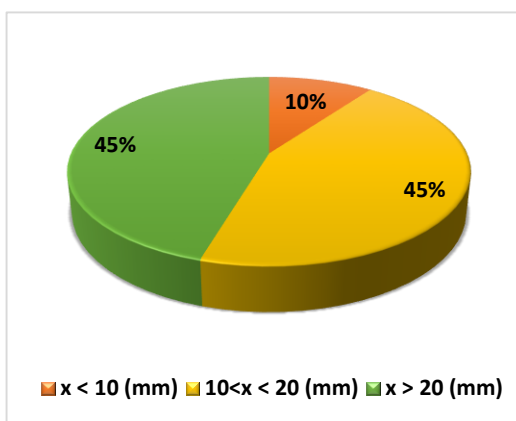


Figura 23: Caracterização média do estruturante recirculado.

O estruturante novo é constituído, em média, por 56% de constituintes com $\varnothing > 20$ mm, mais 11% do que o estruturante recirculado. O estruturante recirculado apresenta a mesma quantidade de partículas de \varnothing entre os 10 e 20 mm do que com $\varnothing > 20$ mm, ou seja, 45%. A percentagem para $\varnothing < 10$ mm, é baixa nos dois tipos de estruturante, ambos na ordem dos 10%.

A caracterização do estruturante recirculado serve para dar conhecimento aos técnicos relativamente ao processo de compostagem. Se a percentagem de estruturante com $\varnothing < 10$ mm for muito elevada significa que, na afinação do composto, o soprador está a ser mal limpo, e que deixa passar muitas partículas. De acordo com os resultados obtidos pode-se afirmar que o sistema de afinação está a funcionar dentro da normalidade.

A caracterização granulométrica do estruturante recirculado permite ainda prever qual será a eficácia da utilização do mesmo no processo de compostagem, bem como a necessidade de adição de uma maior percentagem de estruturante novo face ao recirculado, uma vez que se as suas dimensões forem muito pequenas ($\varnothing < 10$ mm) este acaba por se dissolver e não vai introduzir porosidade na pilha de compostagem, o que afeta diretamente o arejamento da pilha

de compostagem. Quanto maior for a fração de estruturante $\phi > 20$ mm, maior porosidade vai gerar, e mais utilizações poderá admitir, rentabilizando os recursos. Os resultados integrais das análises físico-químicas realizadas ao composto recirculado encontram-se no **Apêndice G**.

Quanto ao TH de ambos os tipos de estruturante, como se verifica pela análise da **Tabela 16**, há uma diferença muito significativa nos valores das duas amostras. O estruturante novo apresenta um TH de 25,48% e o estruturante recirculado 57,75%, mais do dobro do TH (os resultados do TH por frações de granulometria do estruturante encontram-se no **Apêndice G**).

Tabela 16: Comparação do teor de humidade do estruturante (TH - teor de humidade).

Amostra	Análises físico-químicas
	TH (%)
Estruturante recirculado	57,76
Estruturante novo	25,48

O estruturante novo, como era óbvio, têm uma eficácia maior na remoção do TH dos sólidos de centrífuga e promove um melhor arejamento. Mas, por uma questão de eficiência de recursos utiliza-se no processo uma parte de estruturante recirculado, que tem as características já referidas acima, mostrando-se também eficiente, quando misturado com o novo. Ainda assim, por forma a maximizar a eficiência do processo, sugere-se a secagem natural ou forçada do estruturante recirculado. Esta secagem iria permitir num caso de rotura de *stock* do estruturante novo, uma melhor eficiência do estruturante recirculado. Contudo, é necessário fazer primeiramente um balanço, para garantir um equilíbrio custo vs benefício para a gestão de custo da indústria.

4.3. Compostagem em túnel: otimização de variáveis

De forma a clarificar os resultados dos ensaios, este tópico vai ser dividido em três pontos: Entrada de túnel, Em túnel e Saída de túnel. Para cada ponto as análises foram feitas em triplicado, sendo que para análise de resultados é utilizado o valor médio.

4.3.1. Entrada de túnel

Neste primeiro tópico vão apenas ser referidos os valores à entrada de túnel, em média, sendo estes os resultantes das condições iniciais de cada ensaio. No **Apêndice H** encontram-se todas as análises realizadas por ensaio.

Analisando a **Tabela 17** de uma forma geral, as condições à entrada de túnel não são muito díspares, sendo que há alguns valores que se destacam. Os valores de ST variam, em média, entre os 37,71 e os 40,14%, os valores de SV variam, em média, entre 17,87 e 20,41%. Após a adição da estilha de madeira, o TH diminui para valores mais próximos de 60%, em média.

Os valores de MO à entrada de túnel são superiores aos da fração sólida das centrífugas ($\approx 46\%$), devido à adição de estruturante, que tem na maioria da sua constituição MO. Assim sendo, a MO varia em média entre 45,50% m.s., e 52,35%, para o Ensaio 1 Média e para o Ensaio 4 Média, respetivamente. Em média, o Ensaio 4 foi o que apresentou massa volúmica mais baixa, 667,75 g/L, devido a conter menor TH. Nos restantes ensaios a massa volúmica variou entre os 747,50 g/L e 776,17 g/L, em média. O pH no início da compostagem, em média, foi de 9 (básico) e a CE variou entre 2,75 mS.cm⁻¹ e 3 mS.cm⁻¹.

Tabela 17: Valore médios das análises realizadas à entrada de túnel (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; p - massa volúmica; pH; CE - condutividade elétrica).

Referência	Altura da pilha (m)	Rácio E:SC	Entrada de túnel: análises físico-químicas						
			ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	p (g/L)	pH	CE (mS.cm ⁻¹)
Ensaio 1	1,50	1:1	40,31	16,90	59,69	41,92	794,67	9,13	3,26
Ensaio 1'			38,38	18,83	61,62	49,07	738,67	9,29	3,01
Ensaio 1 Média			39,35	17,87	60,66	45,50	766,67	9,21	3,14
Ensaio2	1,50	2:1	37,77	18,71	62,23	49,53	725,00	9,16	3,11
Ensaio2'			37,64	18,44	62,36	49,01	770,00	9,20	3,20
Ensaio 2 Média			37,71	18,58	62,30	49,27	747,50	9,18	3,16
Ensaio 3	1,80	2:1	39,23	18,71	60,77	47,70	751,00	9,02	3,13
Ensaio 3'			38,78	22,10	61,22	56,99	801,33	8,92	2,96
Ensaio 3 Média			39,01	20,41	61,00	52,35	776,17	8,97	3,05
Ensaio 4	2,00	2:1	42,10	21,70	57,90	51,54	656,00	9,12	2,70
Ensaio 4'			38,18	18,59	61,82	48,68	677,50	9,16	2,79
Ensaio 4 Média			40,14	20,15	59,86	50,11	666,75	9,14	2,75

Relativamente à relação C_{org}/N_t , através da **Tabela 18**, verifica-se que em média foi muito idêntica nos dois Ensaios, 17,45 no Ensaio 3 e 17,95 no Ensaio 4. Em ambos os Ensaios o C_t

apresenta uma percentagem superior a do C_{org} , como era esperado. O N_t também foi muito próximo nos dois ensaios, 1,41% e 1,45%, Ensaio 3 Média e Ensaio 4 Média, respetivamente.

Tabela 18: Valore médios das análises realizadas à entrada de túnel (continuação) (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; Relação C/N - relação C_{org}/N_t).

Entrada de túnel: análises físico-químicas						
Referência	Altura da Pilha (m)	Rácio E:SC	C _t (% m.s.)	C _{org} (% m.s.)	N _t (% m.s.)	Relação C/N
Ensaio 3	1,80	2:1	23,22	22,03	1,33	16,63
Ensaio 3'			27,97	27,24	1,49	18,26
Ensaio 3 Média			25,59	24,64	1,41	17,45
Ensaio 4	2,00		27,37	25,59	1,45	17,66
Ensaio 4'			28,04	26,38	1,45	18,25
Ensaio 4 Média			27,70	25,98	1,45	17,95

4.3.2. Em túnel

Neste tópico vão ser analisados, em média, os valores de monitorização das variáveis em túnel de compostagem pelo *software* SCADA para a fase de esterilização, que se encontram na **Tabela 19**. As referências dizem respeito aos ensaios referidos na **Tabela 9** (Ensaio Experimentais: Receitas), ou seja, aos ensaios para otimizar o tempo de compostagem em túnel reator. Para melhor entendimento da monitorização dos mesmos, deve ser consultado o **Apêndice I** (Em Túnel: Monitorização de túnel no SCADA) e o **Apêndice J** (Em túnel: Análise dos dados fornecidos pelo SCADA por Ensaio para a Fase Compostagem e para uma Análise Geral).

Tabela 19: Resultados da monitorização dos túneis de compostagem pelo *software* SCADA para a fase de esterilização (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrifuga).

Referência	Condições		Fase: Esterilização												
	Altura da Pilha (m)	Rácio E:SC	Dias	Oxigénio (%)			Tempo c/ rega (s) / Tempo s/ rega (s)	Tempo c/ ventilação (s) / Tempo s/ ventilação (s)			Temperatura (°C)			Observações	
				Máximo	Mínimo	Média		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média		
Ensaio 1	1,50	1:1	33	20,73	5,70	17,79	0	600/7200	0/7200	242,14/7200	71,10	36,50	52,72		
Ensaio 1'			49	20,11	11,36	18,02	0	1200/7200	120/7200	550/7200	54,90	35,23	48,92	E1'	
Ensaio 2	1,50	2:1	41	20,34	12,90	18,49	0	600/7200	120/7200	286,29/7200	57,90	29,27	49,68	E2	
Ensaio 2'			10	15,00	4,59	10,10	0	1500/7200	180/7200	540/7200	59,11	48,25	55,00		
Ensaio 3	1,80		10	20,50	6,70	15,37	0	300/7200	600/7200	286,67/7200	68,30	38,10	54,21		
Ensaio 3'			34	16,30	10,50	13,77	0	600/7200	180/7200	438,62/7200	62,49	31,20	48,33		
Ensaio 4	2,00		7	11,10	2,70	4,75	0	300/7200	300/7200	300/7200	60,00	44,60	54,36		
Ensaio 4'			19	21,08	0,00	6,80	0	600/7200	180/7200	258,75/7200	64,55	32,70	50,07		
Observações: E1' - As duas sondas de temperatura mediram valores muito próximos dos 55°C; E2 – As temperaturas registadas numa das sondas não estavam a subir, houve a necessidade de abrir o túnel, verificando-se um abatimento ligeiro da altura da pilha e que a sonda se tinha movido. Após a correta colocação da sonda a temperatura começou a subir, mas não atingiu os 55°C.															

Na fase de esterilização, os ensaios que necessitaram, em média, de maior quantidade de O_2 foram os Ensaios 2, Ensaio 1' e Ensaio 1, respetivamente. Estes 3 ensaios foram os que tiveram a altura mais baixa, 1,50 m, com uma particularidade para os Ensaio 1 e Ensaio 1', com rácio 1:1. Ou seja, nestes a quantidade de estruturante foi menor em relação aos restantes ensaios. O Ensaio 4 foi que registou menores percentagens, em média, de O_2 , seguido do Ensaio 4'. De realçar que os Ensaio 4 e Ensaio 4' foram os que tiveram menor massa volúmica à entrada de túnel, respetivamente.

Relativamente à percentagem de O_2 nos túneis de compostagem, na fase de esterilização, a consigna mínima de O_2 para garantir o nível mínimo de oxigénio na fase de subida da temperatura (onde se atingiu as temperaturas mesofílicas) foi de 5%. De realçar que os valores obtidos para as leituras diárias, foram da média diária da leitura das duas sondas. Assim sendo, nesta fase, todos os ensaios realizados cumpriram a consiga de O_2 , com exceção do Ensaio 4, que continha em média, 4,75% de O_2 . No Ensaio 4', o teor de oxigénio foi superior a 5%, mas obteve valores muito baixos, em média 6,80%.

A consigna de controlo de O_2 teoricamente devia ser cumprida à risca mas, na prática, é dada prioridade ao controlo da temperatura que é um parâmetro muito importante, sobretudo na fase de esterilização, e nem sempre foi possível conciliar os dois parâmetros (percentagem de O_2 e temperatura). Contudo, na fase de esterilização, quando o teor de O_2 foi inferior a 5% dever-se-ia ter injetado (através do *software SCADA*) mais ar fresco de forma a subir o teor de O_2 , mas em consequência disso a temperatura iria baixar, uma vez que o ar estava mais frio, o que para controle de patogénicos não era benéfico. No caso do Ensaio 4 e Ensaio 4' como foi verificado que a atividade biológica estava “ok” e a temperatura estava a subir a bom ritmo, não foi aumentado o teor de O_2 no túnel. De realçar ainda que a prioridade foi o controlo da temperatura, que também é um indicador de atividade biológica, e que a baixa percentagem de O_2 só é preocupante no caso de haver metanização e criar atmosfera explosiva. Como os túneis continham um ventilador a injetar ar fresco e o teor de oxigénio era medido no material e não na atmosfera do túnel, esta nunca se tornou explosiva.

Os maiores tempos de ventilação do túnel, em média, foram registados no Ensaio 1' e Ensaio 2', 550 e 540 segundos, respetivamente, para 7200 s sem ventilação. Devido à matéria-prima ter um elevado TH inicial, durante a compostagem em túnel nunca foi necessário regar a pilha (tempo s/ rega sempre igual a 0, como se verifica na **Tabela 19**). Relativamente à temperatura na fase de esterilização situou-se, em média, entre os 48,33°C e os 55°C.

A otimização, da altura, da pilha de compostagem em túnel reator depende do tempo de esterilização, em dias, associado a uma denominada “compostagem em túnel”, de forma a certificar que há morte dos microrganismos patogénicos. De acordo com a consigna de temperatura, a Compostagem Forçada I (temperaturas $\geq 55^{\circ}\text{C}$ e $\leq 70^{\circ}\text{C}$ durante 5 dias), foi a que ocorreu na maioria dos ensaios (ver **Tabela 20**), cumprindo os requisitos para a letalidade dos microrganismos patogénicos. Sendo que a eliminação de todos os microrganismos patogénicos seria conseguida se fossem alcançadas temperaturas de 70°C durante 1 a 2 horas, pelo que as análises nas etapas seguintes do processo de compostagem serão decisivas para verificar a letalidade dos mesmos. Nos Ensaios 3 e 4 e suas réplicas, a denominação de compostagem foi sempre a mesma, Compostagem Forçada I. O Ensaio 2' teve a mesma denominação que os ensaios anteriores, e os restantes ensaios tiveram a denominação Compostagem Forçada II, ou seja, em média, tiveram temperaturas de esterilização inferiores a 55°C . Nestas situações, em que é Compostagem Forçada II, o composto fresco é bem revolvido na pilha de maturação, sendo a existência de microrganismo patogénicos verificada nas análises externas em laboratório acreditado pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC), através de análises ao composto afinado.

Tabela 20: Tipo de compostagem associada à temperatura de esterilização/higienização em túnel (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrifuga).

Passo 1 - Temperatura de Esterilização/Higienização				
Referência	Altura da pilha (m)	Rácio E:SC	Compostagem em túnel (temperaturas, °C)	Observações
Ensaio 1	1,50	01:01	C.F. II (*) (**)	Compostagem Normal (C.N.) – temperatura de 70° C durante 2h; Compostagem Forçada I (C.F. I) – temperaturas ≥ 55 °C e ≤ 70 ° C durante 5 dias; Compostagem Forçada II (C.F. II) - temperatura próxima de 55° C (mas não chega a atingir).
Ensaio 1'			C.F. II	
Ensaio2		02:01	C.F. II (**)	
Ensaio2'			C.F.I	
Ensaio 3	1,80		C.F. I	
Ensaio 3'	C.F. I			
Ensaio 4	2,00		C.F. I	
Ensaio 4'			C.F I	
Notas: (*) A temperatura numa das sondas foi ≥ 70° C durante 2h; (**) Numa das sondas a compostagem foi do tipo C. F. I, mas a média das temperaturas resultou em C.F. II.				

Na literatura foi apresentado o tempo esperado para a permanência do material em túnel reator, para a fase de esterilização, que vai de 7 a 49 dias, seguida da fase de maturação. Através da **Tabela 21** verifica-se que nos ensaios realizados, o limite máximo e o limite mínimo são verificado no Ensaio 1' e no Ensaio 4, respetivamente.

Para a otimização do tempo de permanência em túnel, o Ensaio 4 foi o que mais se destacou, necessitando apenas de 7 dias para atingir a esterilização do composto, seguido do Ensaio 3 e do Ensaio 2', ambos 10 dias. Contudo, analisando a média de dias, por ensaio, para atingir a esterilização, através da **Tabela 21** verifica-se que a média do Ensaio 4 Média (Ensaio 4; Ensaio 4') se volta a destacar, registando o menor número de dias em média para a atingir a esterilização, 13 dias. O ensaio que demorou mais dias, em média, a atingir a esterilização foi o Ensaio 1, que tinha a mesma altura do Ensaio 2 (1,50 m), mas um rácio diferente dos restantes três ensaios. O Ensaio 1 e Ensaio 1' para a mesma quantidade de sólidos de centrífuga tinha menos quantidade de estruturante, ou seja um rácio de 1:1 enquanto os outros três ensaios, e as suas réplicas, tiveram um rácio de 2:1.

Tabela 21: Média dos dias de compostagem na fase de esterilização (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga).

Referência	Altura da pilha (m)	Rácio E:SC	Dias em Esterilização	Total de dias em Túnel
Ensaio 1	1,50	1:1	33	36
Ensaio 1'			49	49
Ensaio 1 Média			41	42
Ensaio2	1,50	2:1	41	49
Ensaio2'			10	24
Ensaio 2 Média			25	36
Ensaio 3	1,80		10	23
Ensaio 3'			34	37
Ensaio 3 Média			22	30
Ensaio 4	2,00		7	30
Ensaio 4'			19	34
Ensaio 4 Média			13	32

No período em que decorreu os ensaios em túnel reator, antes do seu enchimento, não foi possível efetuar a calibração das sondas que medem a temperatura e o oxigénio. Apesar do CITVRSU de Coimbra ter um protocolo laboratorial de “Verificação de sondas de temperatura dos túneis”, não foi possível fazer nenhuma calibração, pelo que a leitura da temperatura pelas sondas, pode conter algum erro. Outros erros na leitura da temperatura (e do oxigénio) pelas sondas podem ter ocorrido devido à diminuição da altura da pilha de compostagem, no caso das alturas mais baixas (1,50 m), como ocorreu no Ensaio 2 (ver **Figura 24**). Neste Ensaio, como as temperaturas registadas numa das sondas não estavam a subir, houve a necessidade de abrir o túnel, verificando-se um ligeiro abatimento da altura da pilha e que uma das sondas se tinha

movido da posição inicial. Após a correta colocação da sonda a temperatura começou a subir gradualmente.



Figura 24: Ensaio 2 - abertura do túnel, durante a compostagem em túnel, para compor as sondas de temperatura e oxigénio (1 - pilha de compostagem com uma altura inicial de 1,50 m (rácio 2:1); 2 - sondas de temperatura e oxigénio colocadas corretamente, notando-se já ligeiro abatimento da pilha de compostagem).

4.3.3. Saída de túnel

Após a matéria a compostar passar pelas fases de esterilização/higienização e compostagem, o túnel reator foi aberto e as alturas dos túneis foram confirmadas. No Ensaio 2 a altura da pilha de compostagem abateu significativamente, passando de 1,50 m para 1,26 a 1,30 m ao longo da pilha (ver **Figura 25**). A possível causa deste abatimento significativo, pode- ter ocorrido devido ao teor de humidade inicial que era de 62,23%, mas houve valores de humidade inicial muito próximos deste, e não ocorreu a mesma situação. Nos restantes ensaios, não se verificou alterações significativas, as alturas mantiveram-se constantes.



Figura 25: Ensaio 2- altura inicial e final na pilha de compostagem (1 - pilha de compostagem com uma altura inicial de 1,50 m (rácio 2:1); 2 - pilha de compostagem com uma altura final de 1,26 a 1,30 m ao longo da pilha).

Para além da confirmação das alturas, foram realizadas análises laboratoriais ao composto fresco, encontrando-se os resultados apresentados em média na **Tabela 22**. Os ST variam entre 38,54% e os 42,62%, em média. Relativamente aos resultados à entrada de túnel, os ST aumentaram e os SV diminuíram e variaram, em média, entre 15,66% e 18,15%. O TH também diminui para valores, em média, entre 57,39% e 61,46%. Como os microrganismos efetuaram a sua função, a MO também diminui para valores, em média, entre 36,70% m.s. e 45,62% m.s.. A massa volúmica situou-se, em média, entre valores de 642,84 g/L e 825,34 g/L. O pH manteve-se básico, em média, entre 8,76 e 9,04 e a CE esteve entre os 2,74 mS.cm⁻¹ e os 3,20 mS.cm⁻¹, em média.

Nesta fase do processo de compostagem era esperado que todos os parâmetros diminuíssem, devido à atividade dos microrganismos que degradam a MO, com exceção dos ST que devido à redução do TH aumentam. Assim sendo, comparando os resultados das análises efetuadas à entrada de túnel (**Tabela 17**), com os de saída de túnel (**Tabela 22**), todos os resultados vão de encontro com o referido, com três exceções. No Ensaio 2, em média, a massa volúmica e a CE aumentarem e no Ensaio 3, em média, a CE também aumentou. Estes valores, não esperados, podem ter ocorrido devido a diversos fatores: as amostras não terem sido recolhida exatamente no mesmo ponto onde foram recolhidas as amostras de entrada de túnel; uma das amostras ter sido recolhida na zona de abertura de túnel (porta), zona onde por vezes devido à elevada precipitação há infiltrações de água no túnel, devido a problemas de impermeabilização da superfície dos túneis. Os problemas de impermeabilização podem ter influenciado toda a amostragem em túnel, não só à entrada de túnel (porta).

Tabela 22: Valores médios das análises realizadas à saída de túnel (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrifuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; CE - condutividade elétrica).

Referência	Altura da pilha (m)	Rácio E:SC	Saída de túnel - análises físico-químicas						
			ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ρ (g/L)	pH	CE (mS.cm ⁻¹)
Ensaio 1	1,50	1:1	44,59	16,71	55,41	37,47	726,67	9,15	2,58
Ensaio 1'			40,64	14,60	59,36	35,93	785,33	8,92	2,93
Ensaio 1 Média			42,62	15,66	57,39	36,70	756,00	9,03	2,75
Ensaio 2	1,50	2:1	37,68	17,02	62,32	45,18	856,00	8,87	3,34
Ensaio 2'			39,40	17,41	60,60	44,19	794,67	9,21	3,05
Ensaio 2 Média			38,54	17,22	61,46	44,68	825,34	9,04	3,20
Ensaio 3	1,80	2:1	37,53	17,48	62,47	46,58	724,33	8,65	2,75
Ensaio 3'			42,13	18,82	57,87	44,66	737,33	8,84	3,55
Ensaio 3 Média			39,83	18,15	60,17	45,62	730,83	8,75	3,15
Ensaio 4	2,00	2:1	41,10	18,01	58,9	43,83	607,67	8,67	2,85
Ensaio 4'			40,36	16,64	59,64	41,23	678,00	8,85	2,63
Ensaio 4 Média			40,73	17,33	59,27	42,53	642,84	8,76	2,74

De salientar que os resultados podem ter sido influenciados pelo tempo de enchimento dos túneis. Ou seja, como o túnel foi preenchido consoante a produção das centrífugas, o material a compostar não foi todo colocado no túnel no mesmo dia, salvo algumas exceções, podendo as três amostras recolhidas durante a “entrada” e “saída” de túnel ter características diferentes influenciando o valor médio dos resultados. A primeira fração de material a preencher o túnel inicia a sua fermentação natural antes do túnel estar totalmente preenchido, atingindo essa fração as temperaturas de higienização primeiro. Daí provem o facto de se fazer a média diária das duas sondas de temperatura, para se determinar os dias em esterilização.

4.3.4. Altura ótima da pilha de compostagem em túnel

Após a análise de todo o processo de compostagem em túnel reator, conclui-se que dos ensaios efetuados, o Ensaio 4 (média dos Ensaio 4 e Ensaio 4'), foi o que apresentou menor tempo de residência em túnel, 13 dias, otimizando assim o processo como era pretendido, com uma altura de 2,00 metros. Esta altura vai ao encontro da gama de alturas ótimas estimadas para as pilhas estáticas arejadas (2,00 a 2,50 m). Contudo, esta poderá não ser ainda a altura ideal, visto que até 2,50 m, ainda há uma gama de alturas a estudar.

O Ensaio 4, em média, foi o que obteve a razão C/N mais elevada à entrada de túnel, 17,49, para 17,45 do Ensaio 3, em média. O Ensaio 3, em média, foi o segundo ensaio a apresentar menores tempos de retenção em túnel, 22 dias.

O rácio de 1:1, não é viável para este tipo de matéria-prima, apresentando o Ensaio 1, em média, o maior tempo de retenção em túnel, 41 dias. O Ensaio 1 e o Ensaio 2, tinham em comum a altura estudada, 1,50 m, mas o Ensaio 2 um rácio de 2:1, apresentando o Ensaio 2, em média, um tempo de retenção em túnel de 26 dias. Assim sendo, a altura de 1,50 m não é a indicada.

A otimização da altura só foi possível devido ao sistema de compostagem utilizado, túnel reator, que permite manter um perfil de temperatura e humidade relativamente homogénea ao longo da altura da pilha de compostagem, possui tratamento de gases, é ventilado e não há necessidade de revolvimento da pilha. Permite também ter acesso remoto em tempo real, através do *SCADA*, à temperatura e percentagem de oxigénio na pilha. Contudo, por vezes a elevada compactação que o material apresenta no interior do túnel, pode proporcionar deficiências de arejamento no seu interior, criando condições para que a matéria entre em fermentação anaeróbia

4.4. Composto maturado

O composto maturado encontra-se na fase final do processo de compostagem, apresentando-se sem odor, com uma cor castanha escura mas com a presença de estruturante. Os resultados obtidos para esta fase encontram-se na **Tabela 23**.

Na fase de maturação, o composto foi amadurecendo reduzindo o TH para valores de $\approx 47\%$, em média, aumentando os ST para $\approx 53\%$, em média. Em consequência destes resultados os SV diminuíram para 21,33% em média. Com a maturação do composto a MO diminui, como era de esperado, para cerca de 40% m.s.. Os resultados obtidos na íntegra para o composto maturado encontram-se no **Apêndice L**.

Tabela 23: Valores médios do composto maturado (ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; Relação C/N - relação C_{org}/ N_t).

Amostra	Análises físico-químicas							
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	C _t (% m.s.)	C _{org} (% m.s.)	N _t (% m.s.)	Relação C/N
Composto Maturado	52,97	21,33	47,03	40,35	24,18	22,95	1,38	16,64

Comparando os resultados obtidos com os da entrada de túnel, verificamos que todos os parâmetros calculados vão de encontro com o esperado. A diminuição do carbono deve-se principalmente à libertação de CO_2 , sendo os valores de C_t e por C_{org} , em média, de 24,18% e 22,95%, respetivamente. O azoto perde-se por volatilização do amoníaco e lixiviação dos nitratos, diminuindo nesta fase para valores, em média, de 1,38%. Posto isto, a razão C_{org}/N_t também diminui para valores de 16,64, em média.

4.5. Grau de maturação: Teste de *Rottegrad*

A análise do grau de maturação do composto é essencial na medida em que permite conhecer as características agronómicas, nomeadamente a germinação e o crescimento de plantas, valor económico e segurança do composto. O grau de maturação foi estudado pelo Teste de *Rottegrad* (CMR), uma vez que era o único que havia possibilidade de efetuar no laboratório da ERSUC. O resultado de todos os Teste de *Rottegrad* efetuados durante o período de estudo encontram-se no **Apêndice M**. Na **Tabela 24** encontra-se o valor médio do Teste de *Rottegrad* associado ao grau de maturação de composto.

A temperatura máxima atingida durante o período do teste foi, em média, $\approx 23^\circ\text{C}$, o que corresponde a um grau de maturação de nível V. Ou seja, o composto encontra-se maturado. Em nenhum dos Testes de *Rottegrad* houve produção de odores, o composto apresentava uma cor castanha escura e uma granulometria homogénea.

Tabela 24: Valor médio do grau de maturação - Teste de *Rottegrad* (nível V - composto maturado).

Valor médio do grau de maturação: Teste de <i>Rottegrad</i>	
Temperatura máxima ($^\circ\text{C}$)	Nível
25,30	V

Apesar do composto se encontrar maturado, na sua aplicação, deve-se ter em conta a que tipo de culturas se destina devido à proveniência da matéria-prima ser da recolha indiferenciada de resíduos urbanos.

4.6. Composto afinado

O composto afinado é o produto final do processo de compostagem. A sua avaliação é muitíssimo importante, na medida em que pode, ou não, influenciar o escoamento do produto. Neste tópico vão ser apenas apresentados e discutidos os resultados, sendo no tópico a seguir discutidos os valores de acordo com o documento legal.

As análises realizadas ao produto final estão apresentadas, em média, na **Tabela 25**. Verifica-se a maior percentagem de ST, determinada ao longo de todo o processo, $\approx 54\%$, em média, devido ao facto de haver menos SV, em média, $19,90\%$ associado ao menor TH alcançado durante todo o processo, $\approx 46\%$, em média. De acordo com a literatura, o TH encontra-se elevado, ligeiramente acima dos 45% recomendados. O composto possui ainda um potencial de MO, em média, de $36,82\%$ m.s..

Tabela 25: Valores médios do composto afinado (ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; CE - condutividade elétrica).

Amostra	Análises físico-químicas						
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ρ (g/L)	pH	CE (mS.cm ⁻¹)
Composto afinado	54,05	19,90	45,95	36,82	533,60	8,49	2,56

A incorporação de corretivos orgânicos no solo aumenta a concentração de sais no solo e a sua CE devido à salinidade do composto. Em média a CE do composto final é de $2,56 \text{ mS.cm}^{-1}$, como se pode verificar na **Tabela 25**. No decorrer das várias etapas da compostagem, a CE foi diminuindo gradualmente. O composto final encontra-se bem maturado (como demonstrado no Teste de *Rottegrad*), caso contrário iria aumentar a concentração de sais no solo e a sua CE devido à salinidade do composto.

Tal como a CE o pH também diminui, situando-se na gama de pH básico, em média de 8,5. A massa volúmica, devido à diminuição do peso e volume causada pela compostagem dos materiais orgânicos, também diminui para cerca de 534 g/L em média. Esta diminuição deve-se ao aumento da concentração de nutrientes, que reduz a necessidade em espaço para armazenamento e transporte. Todas as análises realizadas a esta amostra encontram-se no **Apêndice N**.

O composto final é armazenado em *stock* nas infraestruturas cobertas do TMB, próximo da zona de afinação de composto como se pode verificar na **Figura 26**. Este composto não apresenta odor, tem uma cor castanha escura e tem uma aparência homogénea.



Figura 26: Pilhas de composto afinado em *stock* para venda.

A cada trimestre, foram realizadas análises externas em laboratório acreditado pelo IPAC, ao *stock* de composto afinado. As análises referentes aos últimos três trimestres encontram-se no **Apêndice O**. Através destas verifica-se que o composto não apresenta microrganismos patogénicos, visto que os ensaios de “avaliação de germinação de infestantes e parte de plantas”, “fitotoxicidade” e “*Salmonella*” deram negativo, o ensaio de “*Escherichia coli*” foi <10 ufc/g, que está de acordo com a proveniência deste tipo de composto, e o grau de maturação foi do nível V (maturado). Os resultados obtidos no laboratório acreditado, em comparação com os mesmos parâmetros analisados no laboratório da ERSUC, são muito semelhantes.

4.6.1. Comparação dos resultados obtidos com o documento legal

A qualidade do composto é definida segundo o cumprimento de especificações padronizadas de métodos analíticos e agronómicos que definam a qualidade do produto final da compostagem. Em Portugal foi publicado recentemente, em diário da república, o **Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho**, relativo aos valores limites para colocação no mercado das matérias fertilizantes. Assim sendo, na **Tabela 26**, encontram-se os resultados obtidos para o composto final, através das análises efetuadas no laboratório da ERSUC, para comparar com o referido

decreto-lei e com o documento do Composto FERTISUC. O Composto FERTISUC (consultar **Anexo B**) é um documento identificativo do composto proveniente dos CITVRSU da ERSUC, que indica as menções obrigatórias de identificação que este tem de cumprir e fornece outras informações de interesse para os clientes, tais com o modo de incorporação do composto no solo.

Analisando a **Tabela 26**, verifica-se que o TH do composto afinado se encontra a passar ligeiramente do valor máximo admissível (VMA) de acordo com o Decreto-Lei, mas os restantes parâmetros estão dentro dos limites legais para um corretivo orgânico da classe IIA. Relativamente ao Composto FERTISUC, a MO e a massa volúmica obtiveram valores mais baixos que os tabelados, enquanto, o pH e CE tiveram valores mais elevados. O TH foi correspondente tal como o grau de maturação.

De acordo com o Decreto-Lei n.º103/2015, de 15 de junho pode-se afirmar que o composto produzido no CITVRSU de Coimbra cumpre os parâmetros legais. Contudo, tem de haver um maior controlo do teor de humidade durante o processo de compostagem, para que este fique abaixo dos 45% tabelados.

Tabela 26: Comparação dos resultados obtidos para o composto afinado com o Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho e com o Composto FERTISUC (TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; p - massa volúmica; pH; CE - condutividade elétrica).

Parâmetro	Resultados obtidos em média	DL n.º 103/2015, de 15 de junho		COMPOSTO FERTISUC
		Valores máximos admissíveis	Margem de Tolerância	
TH (%)	45,95	Teor máximo de humidade de 45%		46
MO (% m.s.)	36,82	Teor mínimo de 30% de matéria orgânica (reportada à matéria seca)	20 % do valor declarado, com um máximo de 6 % em valor absoluto.	51
p (g/L)	533,6			570
pH	8,49	$5,5 \leq \text{pH} \leq 9,0$	$\pm 0,5$ do valor declarado.	8,1
CE (mS.cm^{-1})	2,56		15 % do valor declarado.	0,16
Grau de Maturação	V	Grau de Maturação	Categoria de matéria fertilizante	Higienizado
		IV e V	Maturada	
		III	Semimaturada	
		I e II	Fresca	

Apesar do composto cumprir os requisitos legais, atuais, deve-se ter em conta a tipologia de composto orgânico a que este composto pertence e dar-lhe a utilização correta, com a correta incorporação no solo como referido no decreto-lei. O composto do tipo IIA deve ser utilizado em culturas agrícolas arbóreas e arbustivas nomeadamente pomares, olivais e vinhas, e espécies silvícolas.

4.7. Considerações finais do processo de compostagem

A caracterização física à entrada de *pulper* permitiu conhecer a matéria-prima a compostar. Esta tinha um potencial de MO de 60% m.s., em média, e uma TH que ronda os 58%, em média. Depois da digestão da MO, para produção de biogás, a MO ficou reduzida a 46% m.s., em média, e o TH aumentou para 65%, em média, atingindo o ponto mais alto de humidade do processo. De forma a reduzir o TH foi adicionado aos sólidos de centrífuga um agente de volume, estruturante de estilha de acácia, que fez aumentar diretamente a percentagem de MO, e promoveu o aumento da porosidade no material.

Através do *software SCADA* foi possível concluir que a pilha de compostagem em túnel reator, com uma altura de 2,00 m, permite otimizar o processo de compostagem. Ou seja, o objetivo inicial de otimização da variável altura nas pilhas de compostagem em túnel reator, variando a altura da pilha, foi cumprido.

O composto fresco à saída de túnel, já apresentou uma ligeira descida do TH. Na fase de maturação, devido a um bom revolvimento mecânico da pilha, o TH diminui para cerca de 47%, em média, tal como a MO diminui para valores, em média, de 40% m.s.. O grau de maturação atingido foi de nível V, de acordo com o Teste de *Rottegrad*, permitindo obter um composto final de boa qualidade, para os fins destinados de acordo com o documento legal. Apresentando o composto final um TH de $\approx 46\%$, em média, que tem de ser ajustado durante o decorrer do processo de compostagem. A MO apresenta-se então com um potencial de 36,82% m.s., em média, que vai contribuir para a fertilização do solo onde for aplicada, sem recorrer a fertilizantes químicos.

4.8. Sugestões do autor

Após a apresentação e discussão dos resultados, surgem agora algumas sugestões. Uma relativa à melhoria e conhecimento do processo de compostagem, outras a nível de responsabilidade social e de respeito pela natureza e pelos outros.

O estudo da altura ótima da pilha de compostagem em túnel reator deve continuar, mantendo-se as mesmas condições. As alturas a estudar devem ser a partir dos 2,00 m, exclusive, até aos 2,50 m, inclusive. As sondas de temperatura devem ser sempre que possível calibradas, antes do enchimento do túnel reator, recorrendo ao protocolo interno de “Verificação de sondas de temperatura dos túneis”. Esta calibração vai permitir reduzir o erro associado à leitura da temperatura e do teor de oxigénio no túnel reator, através do *software SCADA*.

O plano de amostragem, definido para o estudo, deve continuar a ser aplicado nas análises diárias, nomeadamente no que respeita ao protocolo para determinação do pH e da condutividade elétrica em amostras sólidas. Os pontos de amostragem em túnel reator devem continuar a ser três (início, meio e fim da pilha de compostagem), e não apenas no fim da pilha aquando do fecho de túnel.

De forma a adquirir uma maior otimização do processo de compostagem, deve-se refletir sobre o teor de humidade do estruturante recirculado em comparação com o teor de humidade do estruturante novo. Neste sentido, deve-se estudar uma alternativa, como por exemplo depois da afinação deixar o estruturante recirculado estendido algum tempo ao ar, em pilhas mais pequenas ou pensar num sistema para secar o estruturante.

De forma a contribuir para uma melhor valorização de resíduos biodegradáveis, a ERSUC poderia promover ações de educação ambiental (*workshops*, seminários, palestras) sobre a temática dos resíduos, com foco nos bio-resíduos de forma a promover a compostagem doméstica. Poderia também interagir nas redes sociais, publicando artigos sobre compostagem, e distribuir brochuras nas visitas de estudo ao CITVRSU, de forma a incentivar à compostagem doméstica. No **Apêndice P** encontra-se uma sugestão de brochura de compostagem. Esta brochura poderia também ser colocado no sítio da internet da ERSUC (<http://www.ersuc.pt>), no separador “Educação Ambiental” na opção “Brochuras de Sensibilização”, onde não se encontra nenhuma informação relativa à temática.

5. Conclusão

O uso de composto orgânico na atividade agrícola já é uma prática muito antiga. Os agricultores convertiam e valorizavam os resíduos agrícolas em fertilizantes orgânicos, utilizando-os como fonte de nutrientes para as culturas e para o solo, aumentando a sua produtividade e biodiversidade. Segundo Lavoisier *“na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”*, e era assente nesta máxima que os agricultores antigamente se regiam. Contudo, o aumento populacional em massa e o desenvolvimento industrial fez com que não se conseguisse escoar todos os resíduos, havendo uma deposição excessiva de resíduos valorizáveis em aterro sanitário.

Perante esta situação, a Comissão Europeia impôs o cumprimento de metas, nomeadamente relativas à redução da deposição de resíduos em aterro sanitário e ao sistema de recolha multimaterial, de forma a desviar este tipo de resíduos dos aterros sanitários. Assim sendo, os sistemas municipais e multimunicipais de gestão de resíduos, no âmbito da estratégia nacional para a redução dos RUB destinados a aterro sanitário e para a valorização multimaterial, são essenciais para o aumento da percentagem de resíduos orgânicos sujeitos a algum processo de valorização.

A componente orgânica é uma das maiores frações dos resíduos e, ao ser transformada em composto, contribui para se atingir os objetivos locais de reciclagem. Deste modo, o cumprimento das metas estabelecidas para o tratamento de resíduos biodegradáveis provenientes de recolha indiferenciada de RU, passa atualmente por processos de digestão anaeróbia e compostagem, que se encontram em expansão. Tratam-se de métodos de tratamento de resíduos biodegradáveis, que no caso da digestão anaeróbia converte esses resíduos em energia, o biogás, sob a forma de energia térmica e/ou eletricidade (que permite a substituição dos combustíveis fósseis tradicionais, diminuindo-se as emissões de gases com efeito de estufa), e num composto com valor comercial e, no caso da compostagem. Contudo, para obter um produto final de maior qualidade, a recolha seletiva é portanto fundamental para a recolha eficiente de uma fração orgânica não contaminada.

A compostagem é uma opção cada vez mais popular de gestão de resíduos de forma a procurar desviar parte do fluxo de resíduos dos aterros sanitários locais. É um processo eficaz de valorização da fração orgânica dos RU, com vantagens económicas pela produção do composto, aplicável na agricultura (não está sujeito a lixiviação, ao contrário dos adubos químicos). Contudo, as suas vantagens económicas nos CITVRSU ficam muito aquém das vantagens económicas da produção de biogás, pelo que a otimização do processo é fundamental para

haver menos gastos. Assim, nestes centros opta-se na maioria dos casos pela digestão anaeróbia seguida da desidratação das lamas digeridas. De forma a não depositar as lamas em aterro sanitário, é feita uma compostagem acelerada em túnel reator, seguida de compostagem em meseta e por fim afinação do composto. A otimização do processo de compostagem consiste, então, em obter uma altura ótima em túnel reator para que o pré-composto permaneça o menor tempo possível em túnel, cumprindo os requisitos impostos de esterilização. Assim sendo, chegou-se à conclusão que, das alturas estudadas 2,00 m foi a altura mais favorável, mas mais alturas devem ser estudadas até uma altura de 2,50 m. Também se concluiu que para o tipo de matéria-prima utilizada o rácio de 1:1 não é benéfico, para a otimização da altura ótima da pilha de compostagem em túnel, sendo o rácio de 2:1 mais indicado, uma vez que promove maior arejamento da pilha devido à maior quantidade de estruturante (agente de *bulking*), que vai introduzir porosidade nos sólidos de centrífuga (digestato sólido ou digerido).

Relativamente a uma solução para a redução do teor de humidade do estruturante recirculado, deve ser sempre feito um balanço para garantir um equilíbrio custo vs benefício, de forma a averiguar se a solução é adaptável à gestão de custos da indústria. Ou seja, uma vez que o composto produzido é de qualidade (maturado, sem patogénicos, etc.) só se justifica investir capital em estruturante novo se houver uma grande produção de sólidos de centrífuga, e seja necessário esvaziar túneis com maior rapidez. Ainda assim, por forma a maximizar a eficiência do processo, sugere-se a secagem ao estruturante recirculado. Relativamente à altura da pilha de 2,00m, já não se coloca a questão dos recursos, uma vez que essa altura permite usar os mesmos túneis para compostar mais material, sem comprometer, e ainda melhorando, a eficiência do processo.

O conhecimento da matéria-prima que vai iniciar o processo de fermentação é muito importante, assim como a seleção de materiais efetuados na triagem, uma vez que os resíduos têm um carácter muito diversificado devido à recolha ser indiferenciada, pelo que contêm componentes com elevado valor para o produto final mas também material indesejável. Pelo que, deve ser feito todo o acompanhamento das etapas do processo de compostagem, de forma a detetar eventuais problemas, atualizando e introduzindo novos métodos de análise, de forma a conhecer melhor o produto final.

Feitas estas considerações, pode-se dizer que, no final do processo de compostagem deve-se obter um composto com características de corretivo orgânico, ou seja, um material que pela sua riqueza em matéria orgânica possa ser aplicado ao solo para melhorar ou conservar as suas características físicas, químicas e biológicas, potenciando as suas características de substrato

para a melhoria da produção de culturas. Em termos físicos, o composto deve apresentar um aspeto de terra escura, de granulometria fina, deve estar livre de partículas sólidas inertes, e deve ainda estar isento de odores (indicadores de matéria orgânica ainda em decomposição). O composto deve apresentar valores adequados de densidade (massa volúmica), humidade, capacidade de retenção de água e pH neutro a ligeiramente alcalino.

Deve-se ter sempre em atenção a que categoria pertence o corretivo orgânico de acordo com o Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho, de forma a aplicar o composto nas culturas indicadas de acordo com a sua proveniência. Sendo que, o composto produzido a partir da recolha indiferenciada de RU pertence à classe IIA e deve ser utilizado nos sistemas agroflorestais, nomeadamente nas vinhas e pomares, olival, culturas agrícolas arbóreas e ainda espécies silvícolas. A sua aplicação nestes sistemas promove a agregação dos minerais do solo e consequentemente uma melhoria da sua estrutura, aumentando a resistência aos processos de erosão; aumenta o arejamento e a capacidade de absorção e retenção de água, regulando o fluxo hídrico do solo e prevenindo fenómenos de compactação e alagamento, melhora o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e estimula o desenvolvimento de fauna e flora favorável no solo, entre outra vantagens.

Apesar do produto final ter qualidade, pode-se obter um produto final de elevada qualidade e com maior abrangência de utilização, através da obtenção de uma matéria-prima de elevada qualidade, não contaminada. Esta é conseguida através da recolha seletiva da fração orgânica, assegurando uma produção final limpa e não contaminada de matéria-prima. A implementação de sistemas de recolha seletiva de resíduos orgânicos nos diversos sectores de produção contribuirá ainda para um aumento nos níveis de reciclagem das outras fileiras de materiais, em que a recolha seletiva já se encontra promovida. Pelo que a implementação deste sistema, em locais onde os produtores já procedam à separação de resíduos de embalagem, por exemplo, a implementação de um sistema de separação de resíduos orgânicos será facilitado, uma vez que já existem boas práticas de separação interiorizadas.

Em suma, a compostagem é uma tecnologia facilmente ajustável e adequada para o tratamento de resíduos de vários estratos socioeconómicos e áreas geográficas. Existem diversas opções tecnológicas disponíveis desde pequenos compostores domésticos a unidades de compostagem centralizadas e com tecnologia de ponta, sendo que a tecnologia e o circuito de recolha associado podem ser facilmente organizados. Os sistemas de compostagem são usualmente bem aceites pelas populações, em oposição com a resistência associada à instalação de outros sistemas de tratamento de resíduos como a incineração ou deposição em aterro sanitário. Além

de que, a fração orgânica dos resíduos é uma das frações mais poluentes dos RU e a compostagem permite desviar estes resíduos dos circuitos habituais de eliminação como a incineração e a deposição em aterro sanitário.

6. Referências Bibliográficas

- Agência Portuguesa do Ambiente. (Janeiro de 2011). Obtido em 20 de Agosto de 2015, de Caracterização física: www.apambiente.pt/_cms/view/page_doc.php?id=973
- Agência Portuguesa do Ambiente. (Gestão de Resíduos Urbanos - Dados sobre Resíduos Urbanos de 2013). Obtido em 2 de Setembro de 2015, de <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933&sub3ref=936>
- Bremner, J. M. (1979). Total Nitrogen. Em C. Black, D. Evans, J. White, L. Ensminger, & F. Clarck, *Methods of Soil Analyses. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. (p. 1149-1178.). 5th edition. Agronomy 9. eds. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Brito, M. (2005). *Manual de Compostagem da ESALP*. Instituto Superior de Viana do Castelo - Escola Superior Agrária de Ponte de Lima. Obtido em 21 de Fevereiro de 2015, de http://www.ci.esapl.pt/mbrito/compostagem/Manual_Compostagem.htm
- Castanheira, L., Ferreira, V., & Lopes, C. (2004). *Valorização de Resíduos Orgânicos*. eds. NORTE - Energia e Desenvolvimento Sustentável na Região Norte.
- Christensen, T. H. (2011). *Solid Waste Technology & Management* (Volume 2). Wiley.
- Clesceri, S., Greenberg, A., & Eaton, A. (1999). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (20th ed.). American Public Health Association.
- Comissão Europeia. (2015). Resíduos. *Revista Ambiente para os Europeus*. Obtido em 27 de Abril de 2015, de http://ec.europa.eu/environment/news/efe/themes/waste/index_pt.htm
- Cordeiro, N. M. (2010). *Compostagem de Resíduos Verdes e Avaliação da Qualidade dos Compostos Obtidos - Caso de Estudo da ALGAR, S.A. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente – Tecnologias Ambientais*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior de Agronomia.
- Correia, F. N. (2007). *PERSU II: Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos 2007 - 2016* (1ª ed.). Lisboa, Lisboa, Portugal: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional.
- Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho. (15 de Junho de 2015). *Diário da República*, 3756-3788. Obtido de <https://dre.pt/>
- Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto. (10 de Agosto de 2009.). *Diário da República*, 5170-5198. Obtido de <https://dre.pt/>
- Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho. (17 de Junho de 2011). *Diário da República*, 3251-3300. Obtido de <https://dre.pt/>
- DG ENV. A.2. (2001). *Biological treatment of biowaste, 2nd Draft of biological treatment – Working Document*. (February 2001). European Commission, Brussels. 26p. Obtido em 9 de Novembro de 2015, de

<http://mie.esab.upc.es/ms/informacio/legislacio/Unio%20Europea/working%20document%20biowaste%202.pdf>

DG ENV. A.2/LM (2003). *Biowastes and Sludges – Draft Discussion Document*. (December 2003) European Commission, Brussels. 22p. Obtido em 9 de Novembro de 2015, de https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjft5enr83JAhXIXhoKHWktDMIQFggsMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.ewa-online.eu%2Fcomments.html%3Ffile%3Dtl_files%2F_media%2Fcontent%2Fdocuments_pdf%2FEuropean%2520Water%2520Policy%2FComments%2FSewage%2520Sludge%2FEWA_WD_sludge.pdf&usg=AFQjCNGkZIlq_q3Fo5j_WktnaXZxtfqrA&bvm=bv.109332125,d.d2s

Diaz, L. F., G. M., Eggerth, L. L., & Golueke, C.G. (1993). *Composting and Recycling Municipal Solid*. Citado por Russo (2003).

Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. (19 de Novembro de 2008). *Jornal Oficial da União Europeia*, 312/3 - 312/28.

EGF. (2015). *Apresentação do Grupo EGF*. Obtido em 1 de Abril de 2015, de Empresa Geral de Fomento, S.A.: <http://www.egf.pt>

EN 13037:1999. *Soil improvers and growing media – Determination of pH*. (December 1999). CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels. 9p.

EN 13038:1999. *Soil improvers and growing media – Determination of electrical conductivity*. (December 1999.). CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels. 14p.

EN 13039:1999. *Soil improvers and growing media – Determination of organic matter content and ash*. (December 1999). CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels. 7p.

EN 13040:1999. *Soil improvers and growing media - Sample preparation for chemical and physical tests, determination of dry matter content, moisture content and laboratory compacted bulk density*. (December 1999). CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels. 14p.

EN 13650:2001. *Soil improvers and growing media - Extration of aqua regia soluble elements*. (September 2001). CEN – Comité Européen de Normalisation, Brussels. 17p.

Epstein, E., Taylor, J. M, & Chanet, R. L. (1982). *Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some physical and chemical properties*. Citado por Russo (2003).

ERSUC. (2012). *Normas de Carga e Descarga no Centro Integrado de Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos, Revisão A*, 1-19. Obtido em 1 de Abril de 2015, de http://ersuc.pt/www/dados/documentacao/Normas_Carga_Descarga_CITVRSU_r01.pdf

ERSUC. (2013). *ERSUC - Resíduos Sólidos do Centro, S.A*. Obtido em 1 de Abril de 2015, de <http://ersuc.pt/>

- Exemplos de compostagem e de recolhas selectivas bem sucedidas*. Comissão Europeia, Direção Geral do Ambiente . (2000). Bruxelas.
- Fernandes, A. C., Teixeira, A., & Guerra, M. D. (2014). *Relatório do Estado do Ambiente 2014*. Portugal: Agência Portuguesa do Ambiente.
- Google Maps. (2015). Obtido em 1 de Abril de 2015, de Pesquisar no Google Maps (ERSUC: CITVRSU-Coimbra, Vil de Matos): <https://maps.google.pt/>
- ISO 3696:1987. *Water for analytical laboratory use – Specification and test methods*. International Organization for Standardization. 5p.
- Kompoferm Modular Plants. (s.d.). Obtido em 19 de Agosto de 2015, de Waste Transforming Systems: <http://www.kompoferm.com/pt/>
- LECO®. (1997). *Instruction Manual SC-144DR Dual Range Sulfur and Carbon Analysis System*.
- Levy, J. D., & Cabeças, A. J. (2006). *Resíduos Sólidos Urbanos - Princípios e Processos*. Lisboa: Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente (AEPSA).
- Livro Verde sobre a gestão dos bio-resíduos na União Europeia*. Comissão das Comunidades Europeias. (2008). Bruxelas: União Europeia.
- Martinho, M. G., & Gonçalves, M. G. (2000). *Gestão De Resíduos* (1.ª ed.). Lisboa, Portugal: Universidade Aberta.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse* (3rd ed.).
- Methods Book for the Analysis of Compost*. (2003). Germany: Federal Compost Quality Assurance Organisation (FCQAO) & Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK).
- Misra, R. V., Roy, R. N., & Hiraoka, H. (2003). *On-farm composting methods. Land and Water Discussion Paper*. . FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Morel, J. L., Colin, F., Germon, J. G., & Juste, C. (1985). “*Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost*”, In *Composting of agricultural and other wastes*. Citado por Russo (2003).
- Oliveira, J. F., Mendes, B., & Lapa, N. (2009). *Resíduos: Gestão, Tratamento e sua Probleemática em Portugal*. Lidel - edições técnicas, lda.
- Pereira Neto, J. T., Stentiford, E. I., & Mara, D.D. (1986). “*Comparison of Windrow and Aerated Static*. Citado por Russo (2003).
- Pereira Neto, J. T. (1987). “*On the Treatment of Municipal Refuse and Sewage Sludge Using Aerated Static*. Citado por Russo (2003).
- Portaria n.º 851/2009, de 7 de Agosto. (7 de Agosto de 2009). *Diário da República*, 5143-5146.
- Póvoas, I., & Barral, M. F. (1992). *Métodos de análise de solos. Comunicações*. Instituto de Investigação Científica Tropical. Série de Ciências Agrárias. Lisboa. 61 p.
- Russo, M. A. (2003). *Tratamento de Resíduos Sólidos*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Departamento de Engenharia Cível .

- Santos, A. (1 de Agosto de 2013). ERSUC- Resíduos Sólidos do Centro, S.A. *Manual de Acolhimento da ERSUC, Revisão C*, 1-19. Obtido de Documento interno da ERSUC
- SCADA. (2015). Obtido em 24 de Fevereiro de 2015, de Supervisory Control and Data Acquisition: <http://scada.com/>
- Silva, F., Mateus, I., Marçal, A., Ricardo, S., & Pires, S. (2014). *Resíduos Urbanos - Relatório Anual 2013*. Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.
- Sistema Integrado de Gestão da ERSUC*. (2014). Obtido em 27 de Março de 2015, de ERSUC Resíduos Sólidos do Centro, S.A.: Documento interno da ERSUC (Sistema Integrado de Gestão)
- Slater, R. A., & Frederickson, J. (2001). *Composting municipal waste in the UK: some lessons from Europe*. *Journals Elsevier: Resources, Conservation and Recycling*. Volume 32, Issues 3-4, p. 359-374. Obtido de <http://www.sciencedirect.com/>
- Soares, M. (2005). *Manual de Avaliação da Qualidade de Compostos Orgânicos Obtidos por Compostagem na ESAC*. Escola Superior Agrária de Coimbra - Instituto Politécnico de Coimbra. Projeto EMAS@SCHOOL.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. (P.H. King, & R. E. Emeritus, Eds.) United States of America: McGraw-Hill International Editions.
- Valente, B. S., et al. (2009). *Issues Concerning Composting of Organic Residues. Revisão Bibliográfica: Fatores que Afetam o Desenvolvimento da Compostagem de Resíduos Orgânicos*. Thematic areas: Life Sciences, Agrarian Sciences and Rural Development, Environmental Sciences and Technologies, p. 59-85. Obtido de http://www.uco.es/organiza/servicios/publica/az/php/img/web/07_18_48_1395REVISIONFatoresValente1.pdf
- Zucconi, F., Forte, M., & Bertoldi, M. (1987). *Biological evaluation of compost maturity*. Citado por Russo (2003).
- Zucconi, F., Monaco, A., & Forte, M. (1985). *Phytotoxins during the stabilization of organic matter*. In: *Composting of agricultural and other wastes*. Citado por Cordeiro (2010).

7. Anexos

Anexo A: Métodos de referência de amostragem e de análise a efetuar a corretivos orgânicos

A **Tabela 27** refere os parâmetros e métodos de referência relativos aos corretivo orgânicos pertencente à classe IIA do Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho, ou seja, composto produzido a partir da recolha indiferenciada de resíduos urbanos.

Tabela 27: Métodos de referência a adotar na determinação dos valores característicos das matérias fertilizantes do Grupo 5.

(Fonte: Adaptado de Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de Junho)

Parâmetro	Grupo 5 - Método de Referência
Amostragem	EN 12579.
Preparação da amostra	EN 13040.
Humidade	EN 13040. Resultados expressos em %.
Massa volúmica aparente	EN 12580. Resultados Expressos em kg L ⁻¹ (matéria original).
pH (H ₂ O)	EN 13037. Resultados expressos na matéria original.
Condutividade Elétrica	EN 13038. Resultados expressos em mS cm ⁻¹ (matéria original).
Azoto nítrico	EN 13652.
Azoto amoniacal	EN 13652.
Azoto total	EN 13654. Resultados expressos em % (matéria seca).
Granulometria	Fração <20 mm: Pesar 1 kg de amostra original e crivar usando um crivo de 20 mm e pesar as matérias separadas por crivagem. Resultados expressos em % (matéria original).
	Fração <10 mm: Pesar 1 kg de amostra original e crivar usando um crivo de 10 mm e pesar as matérias separadas por crivagem. Resultados expressos em % (matéria original).
	Fração <5 mm: Pesar 1 kg de amostra original e crivar usando um crivo de 5 mm e pesar as matérias separadas por crivagem. Resultados expressos em % (matéria original).

Parâmetro	Grupo 5 - Método de Referência	
Matéria orgânica	EN 13039. Resultados Expressos em % (matéria seca).	
Carbono total	Análise elementar. Resultados expressos em % (matéria seca).	
	Calculo: Teor de matéria orgânica/1,8. Resultados expressos em % (matéria seca).	
Potássio (K ₂ O), cálcio (CaO) e magnésio (MgO) «totais»	EN 13650. Resultados expressos em % (matéria seca).	
Cádmio, cobalto, crómio, cobre, ferro, molibdénio, níquel, manganês, chumbo e zinco «totais»	EN 13650. Resultados expressos em mg kg ⁻¹ (matéria seca).	
Boro (B) e fósforo (P ₂ O ₅) «totais»	EN 13650. Resultados expressos em mg kg ⁻¹ (matéria seca).	
	Incineração a (450±10) °C e digestão com uma solução clorídrica de cinzas. Doseamento por ICP (espectrofotometria por emissão de plasma) ou por EAM UV/VIS (espectrofotometria de absorção molecular ultravioleta/visível). Resultados expressos em mg kg ⁻¹ (matéria seca).	
Enxofre total	Extração com ácido clorídrico e determinação por ICP (espectrofotometria por emissão de plasma)	
Mercúrio «total»	EN 13650. Resultados expressos em mg kg ⁻¹ (matéria seca).	
	EN 16174. Resultados expressos em mg kg ⁻¹ (matéria seca).	
	Decomposição térmica, formação de amálgama e quantificação do vapor de Hg em EAA (espectrofotometria de absorção atómica com chama) sem chama. Resultados expressos em mg kg ⁻¹ (matéria seca).	
<i>Salmonella spp.</i>	ISO 6579.	
	ISO 6579/Cor 1.	
	ISO 657/Amd 1. Annex D.	
<i>Escherichia coli</i>	ISO 16649-2 ⁽¹⁾ . Resultados expressos em número de células viáveis/g (matéria fresca).	⁽¹⁾ - Recomenda-se uma toma mínima de 20 g de matéria fresca, diluída 1:5 ou
	ISO/TS 16649-3 ⁽¹⁾ . Resultados expressos em número de células viáveis/g (matéria fresca).	

Parâmetro	Grupo 5 - Método de Referência	
		1:10 em solução estéril de NaCl 0,9% e agitação a 150 rpm, a (5±3) °C, durante o tempo necessário para que se obtenha a máxima homogeneidade possível
	ISO 9308-2 ⁽¹⁾ . Resultados expressos em número de células viáveis/g (matéria fresca).	
Grau de maturação (teste de Auto aquecimento)	Metodologia proposta in «Gütesicherung Kompost RAL -GZ 251 (2006)» Resultados expressos em grau de maturação (I a V).	
	Metodologia proposta in «Methods book for the analysis of compost (1994) Federal Compost Quality Assurance Organization, pp16 -19». Resultados expressos em grau de maturação (I a V).	
Materiais inertes antropogénicos e pedras	Metodologia proposta in «Methods book for the analysis of compost» (1994) Federal Compost Quality Assurance Organisation, pp. 41 -43». Resultados expressos em % (matéria seca).	
Fitotoxicidade	EN 16086 -1. Resultados expressos em % de germinação.	
	EN 16086 -2. Resultados expressos em % de germinação.	
	ISO 11269 -2. Resultados expressos em % de germinação.	
	ISO 17126. Resultados expressos em % de germinação.	
	Metodologia proposta in «Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. and de Bertoldi, M. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. BioCycle, 22, 54 -57». Resultados expressos em % de germinação.	
Sementes e propágulos de infestantes	CEN/TC BT TF 151. Resultados expressos em n.º/L de amostra.	
	ONORM S 2023 in «Analytic methods and quality control of compost (Austrian Standards Institute,1996)». Resultados expressos em n.º/L de amostra.	
Ácidos húmicos	Extração com pirofosfato de sódio ou hidróxido de sódio e determinação por EAM UV/VIS (espectrofotometria de absorção atómica com chama).	
Ácidos fúlvicos		
Compostos húmicos		

Anexo B: Composto FERTISUC

Neste anexo encontra-se as menções para o “Composto FERTISUC”, que é constituído por 3 páginas: **Figura 27**, **Figura 28** e **Figura 29**, respetivamente.

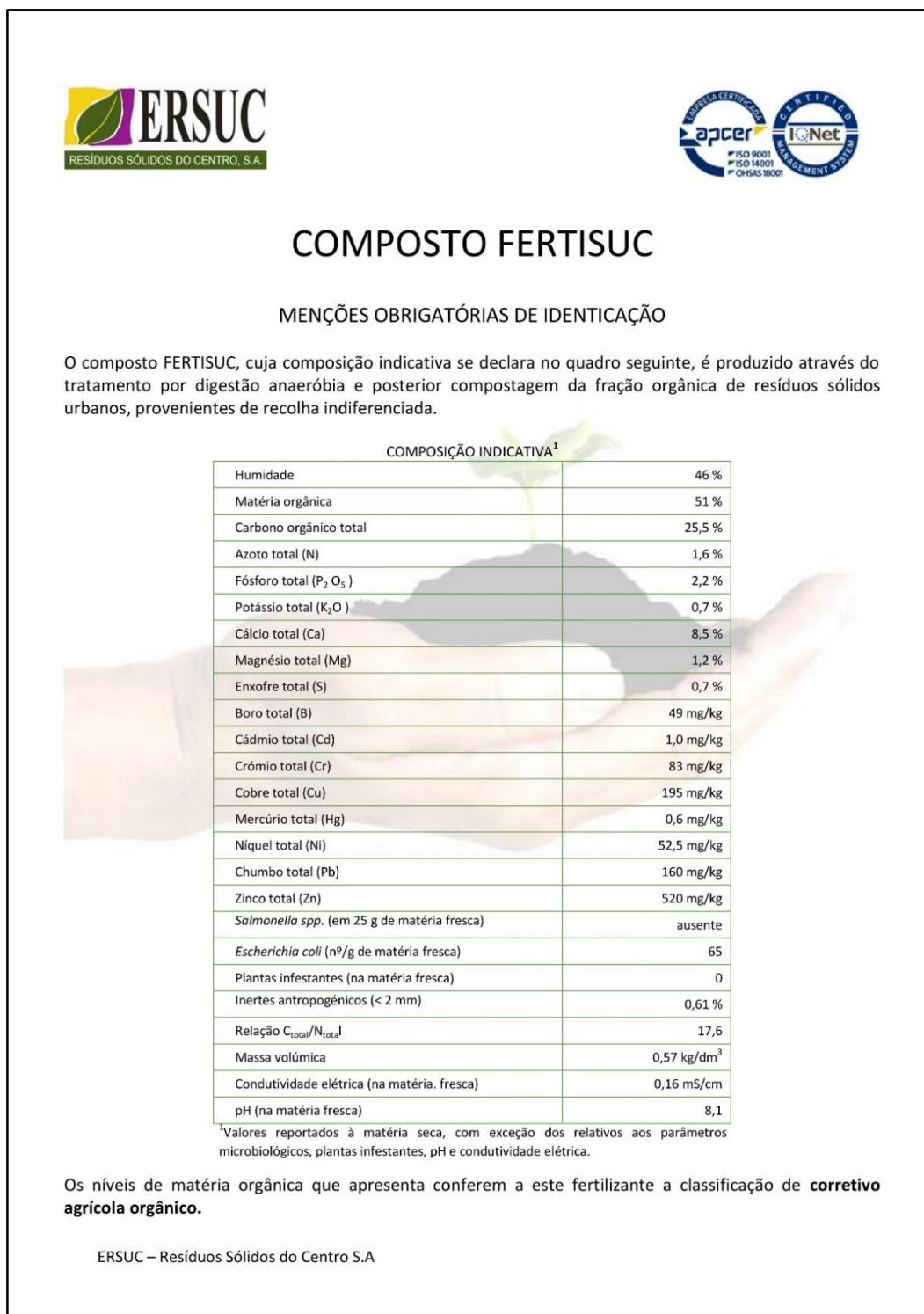




Figura 27: Composto FERTISUC (página1/3).

Encontra-se higienizado e não contém sementes ou propágulos de plantas infestantes, para além de estar maturado, pelo que as aplicações deste fertilizante podem realizar-se num prazo inferior a três semanas, antes da sementeira ou plantação.

Por estar inserido na classe de qualidade IIA, o seu uso (para culturas destinadas à alimentação) dever-se-á restringir a solos para a implantação ou manutenção de espécies arbóreas e arbustivas, nomeadamente pomares, olivais e vinhas. Poderá, contudo, ser utilizado para solos destinados a espécies silvícolas, jardinagem, culturas bioenergéticas, produção florícola e relvados, designadamente de campos de futebol e de golfe.

Quando se pretender aplicar o composto (o que, geralmente, se realiza de três em três anos) dever-se-á ter em conta que a quantidade a aplicar anualmente não deverá ultrapassar 10 toneladas por hectare de matéria fresca.

O composto FERTISUC é comercializado a granel, sob a forma pulverulenta. A massa bruta garantida deste produto é de 0,5 kg/dm³. A responsabilidade pela colocação deste composto no mercado é da empresa:

ERSUC – Resíduos Sólidos do Centro, S. A.
 Rua Alexandre Herculano, 21 B
 3000-019 Coimbra
 Telefone: 239851910 Fax: 239851918

OUTRAS INFORMAÇÕES DE INTERESSE PARA O CONSUMIDOR

O composto deve ser espalhado no solo, quando as condições do terreno permitirem que as máquinas operem, e incorporado na camada arável, com a brevidade possível, a uma profundidade adequada, consoante a espécie da planta que se pretende instalar. Também se podem realizar fertilizações localizadas ou à cova, sendo necessário, nestes tipos de aplicação, ter-se o cuidado de se calcularem as quantidades a aplicar, para que não se excedam as doses recomendadas por hectare.

Por se tratar de um corretivo orgânico, a sua aplicação deve ser complementada com uma adubação mineral racional, calculada em função das necessidades nutritivas da planta a cultivar, da produção esperada e do teor de nutrientes minerais no solo; no cálculo da dose de adubo mineral a aplicar será, também, conveniente que se tenham em conta as quantidades de nutrientes veiculados pelo composto, nomeadamente de azoto, fósforo e potássio, porque deste cuidado resultarão vantagens no plano económico, agronómico e ambiental.

Como para todos os corretivos orgânicos, a aplicação do composto deverá realizar-se de acordo com a observação de boas práticas agrícolas que visam prevenir efeitos nefastos sobre o ambiente, as quais se descrevem seguidamente:

ERSUC – Resíduos Sólidos do Centro S.A

Figura 28: Composto FERTISUC (página 2/3).



- É recomendável que, sempre que possível, as aplicações de composto tenham em consideração as características deste fertilizante e os resultados das análises de terra (que deverão, preferivelmente, realizar-se de três em três anos, e, no máximo, de quatro em quatro anos) do solo recetor, nomeadamente o pH e os teores de matéria orgânica, de macronutrientes minerais e de metais pesados. No caso destes últimos, só se deverão efetuar aplicações se a concentração no solo recetor em qualquer dos elementos não exceder o valor indicado no quadro seguinte.

VALORES MÁXIMOS ADMISSÍVEIS PARA OS TEORES "TOTAIS"* DE METAIS PESADOS NOS SOLOS EM QUE SE PRETENDE APLICAR COMPOSTO.

Elemento	Valores máximos admissíveis (mg/kg)		
	$5 \leq \text{pH} < 6$	$6 \leq \text{pH} < 7$	$\text{pH} \geq 7$
Cádmio	0,5	1	1,5
Chumbo	50	70	100
Cobre	20	50	100
Crómio	30	60	100
Mercurio	0,1	0,5	1
Níquel	15	50	70
Zinco	60	150	200

* Fração solúvel em água-régia.

- Não deve deixar-se o composto à superfície do solo, mas incorporar-se através de mobilização adequada. No caso de terrenos declivosos, não devem efetuar-se aplicações quando se suspeite da ocorrência de forte precipitação. O seu provisório empilhamento no solo só deverá realizar-se em locais de fácil drenagem, de pouco declive e não passíveis de inundação, sendo que as pilhas devem distanciar-se de, pelo menos, 10 metros de cursos de água e valas de drenagem e 35 metros de furos ou poços para captação de água destinada ao consumo humano ou animal.
- Quando as condições do terreno, principalmente o seu declive, e as características do solo, nomeadamente a sua permeabilidade à água, são propícias à contaminação dos meios hídricos por nitratos, o azoto veiculado pelo composto não deverá ultrapassar 170 kg por hectare e por ano.
- O composto não deverá ser aplicado, especialmente quando o terreno é declivoso, a menos de 35 metros de fontes e poços de captação de água para consumo, nem a menos de 10 metros das margens de ribeiros, lagoas ou valas.

Data: 12-03-2014

Versão: A

ERSUC – Resíduos Sólidos do Centro S.A

Figura 29: Composto FERTISUC (página 3/3).

8. Apêndices

Apêndice A: Grupo EGF, S.A.

O grupo EGF, S.A. é uma sub-*holding* do Grupo Águas de Portugal (AdP), e assume como prioridade o apoio à estruturação e definição das políticas de ambiente na área dos resíduos (com destaque para o aumento da recolha seletiva de embalagens multimaterial e do desvio de RUB da deposição em aterro sanitário) contribuindo assim para o cumprimento das estratégias e metas nacionais e comunitárias para o setor, recorrendo às melhores técnicas disponíveis (MTD's), de forma a contribuir para a melhoria da qualidade de vida e do ambiente (EGF, 2015). Na **Figura 30**, encontra-se esquematizado a cadeia de valor do Grupo EGF,S.A.

A gestão dos sistemas de tratamento e valorização de resíduos é feita através de 11 empresas concessionárias, constituídas em parceria com os municípios servidos, que processam anualmente cerca de 3,7 milhões de toneladas de RU produzidas em 174 Municípios, servindo cerca de 60% da população de Portugal, que corresponde a 6,4 milhões de habitantes (EGF, 2015).

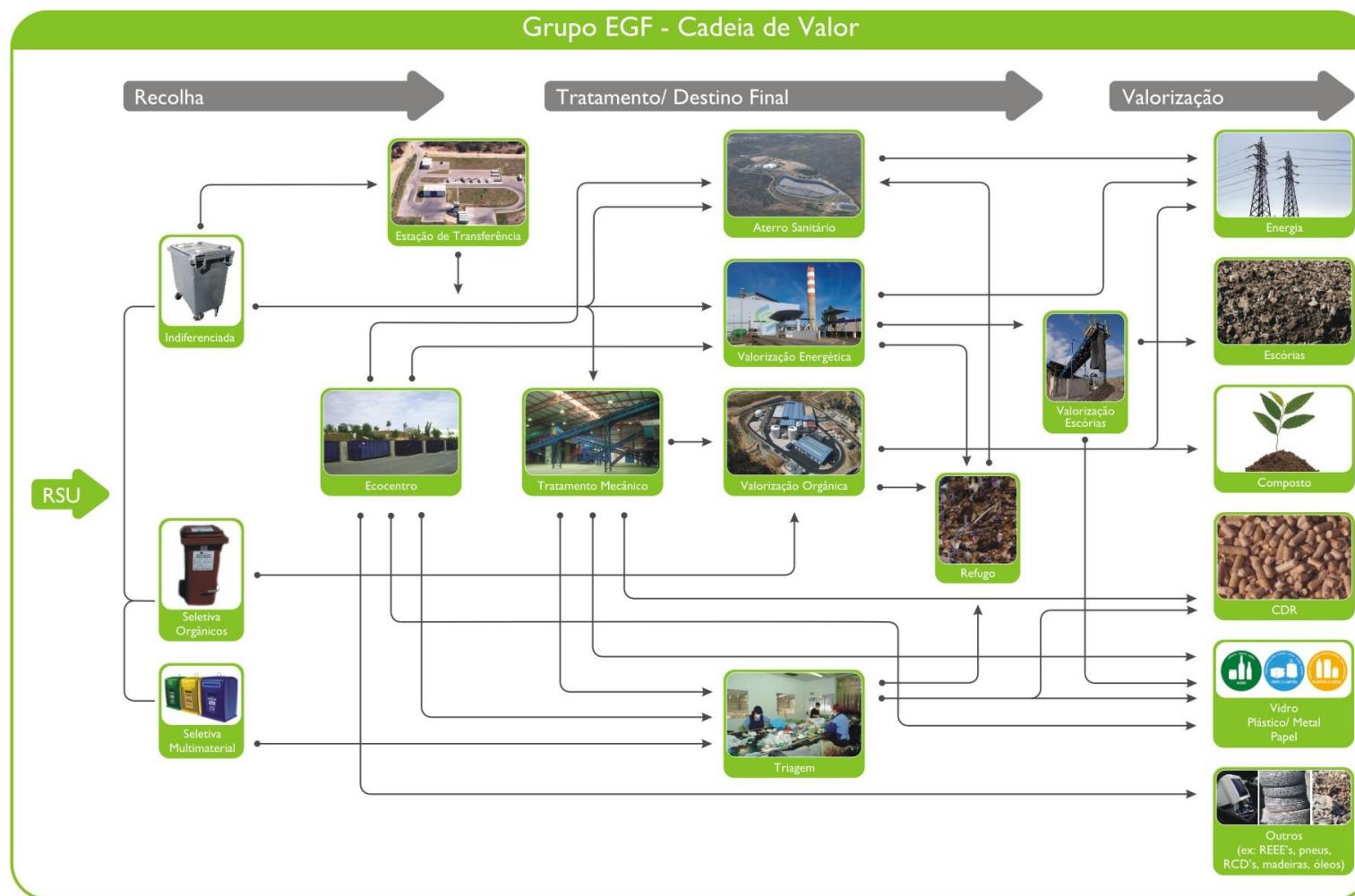



Figura 30: Cadeira de valor do Grupo EGF, S.A.

(Fonte: EGF, 2015)

Apêndice B: Protocolo Laboratorial: Determinação do pH e da condutividade elétrica

Neste apêndice encontra-se o protocolo laboratorial supracitado, composto por 2 páginas:

Figura 31, Figura 32, respetivamente.

	ER25 – Unidade de Tratamento Mecânico e Biológico	
	PL02 – Determinação de propriedades Físico- químicas	Data: 26-02-15
	PL02-12- pH e condutividade elétrica em amostras sólidas	Versão: A

1. **Documentos associados:** PL02-02, PL02-05, PL04-02, PL05-01 e PL05-02

2. **Amostragem:** Procedimento de colheita de amostras sólidas (PL04-02)

3. **Material e reagentes:**

- Balança analítica (BAL- I01);
- Centrifuga (CEN-I01);
- Copos de centrifuga;
- Espátula;
- Goblê;
- Magnetes;
- Medidor e eletrodo de pH (MED-I03 e IPH-I01);
- Medidor e Sonda de condutividade elétrica (MED-I02 e ICO-I01);
- Medidor e sonda de temperatura (MET-I01 e ITE-I01);
- Papel absorvente;
- Peneiro com malha de 20mm;
- Pipeta;
- Placa de agitação e aquecimento (PAA-I01);
- Pompe;
- Proveta.

- Água desionizada.

4. **Procedimento Experimental:**


4.1. Preparação do estrato aquoso

- a) Peneirar a amostra sólida num crivo de malha de 20mm;
- b) Determinar a densidade da amostra através do procedimento PL02-05;
- c) Estipular o volume de amostra sólida necessário para a análise de pH e condutividade e determinar as gramas correspondentes;

Para a determinação do pH e condutividade eléctrica do composto, segundo as normas EN 13037 e EN 13038, devem ser usados 60ml de composto para 300ml de água desionizada.

ERSUC Mod. ER25i-030 / Rev. A 1 / 2

Figura 31: Protocolo Laboratorial: Determinação do pH e da condutividade elétrica (página 1/2)

	ER25 – Unidade de Tratamento Mecânico e Biológico	
	PL02 – Determinação de propriedades Físico- químicas	Data: 26-02-15
	PL02-12- pH e condutividade elétrica em amostras sólidas	Versão: A

- d) Colocar um goblé na balança analítica e tarar o seu peso;
- e) Com o auxílio de uma espátula colocar no goblé a massa de amostra calculada;
- f) Com uma proveta medir a quantidade necessária de água desionizada;
- a) Juntar a massa pesada à água desionizada e homogeneizar o preparado (agitação manual no goblé com a espátula);
- g) Colocar o magnete no goblé;
- h) Colocar o goblé com o magnete na placa de agitação e agitar durante 1 hora a uma temperatura de 22°C \pm 3°C;
- i) Inserir os eletrodos de pH e de temperatura na solução e proceder à medição do pH, segundo o procedimento PL02-02;
- j) Proceder à centrifugação da amostra, a 5000rpm durante 5 minutos, segundo o procedimento PL05-01;
- k) Com uma pipeta e a pompete retirar o máximo de estrato aquoso para um goblé;
- l) Introduzir os eletrodos de condutividade e temperatura na solução e proceder à medição da condutividade elétrica segundo o procedimento PL02-04.

5. Observações:

Em alternativa à centrifugação pode ser usado o método de filtração (PL05-02)


6. Referências bibliográficas:

- EN 13037:1999 - Soil improvers and growing media – Determination of pH;
- EN 13038:1999 - Soil improvers and growing media – Determination of electrical conductivity.

Figura 32: Protocolo Laboratorial: Determinação do pH e da condutividade elétrica (página 2/2).

Apêndice C: Protocolo Laboratorial: Caracterização granulométrica

Neste apêndice encontra-se o protocolo laboratorial supracitado, como se pode verificar através da **Figura 33**.

	ER25 – Unidade de Tratamento Mecânico e Biológico	
	PL02 – Determinação de propriedades Físico- químicas	Data: 22-04-15
	PL02-15 – Caracterização granulométrica	Versão: A

- Documentos associados:** PL02-07, PL04-02
- Amostragem:** Procedimentos de recolha de amostras sólidas (PL04-02).
- Material e reagentes:**
 - Balança (BAL- I02);
 - Crivo de malha de 10mm;
 - Crivo de malha de 20mm;
 - Recipientes para pesagem.
- Procedimento Experimental:**
 - Pesar a amostra sólida total (M_t);
 - Peneirar a amostra sólida num crivo de malha de 10mm;
 - Pesar a porção de amostra <10mm ($M_{<10}$);
 - Peneirar a porção de amostra >10mm num crivo de malha de 20mm;
 - Pesar a porção de amostra >10mm e <20mm ($M_{<20}$);
 - Pesar a porção de amostra retida no crivo de malha de 20mm ($M_{>20}$).
- Apresentação de resultados:**

Determinar os percentis de cada uma das fracções segundo a Equação 1.

$$\% \text{ Fracção} = \frac{M_f}{M_t} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

M_f – Massa de cada uma das fracções ($M_{<10}$, $M_{<20}$ ou $M_{>20}$);

M_t – Massa da amostra total
- Observações:**
 - Averiguar visualmente a necessidade de proceder à secagem da amostra antes da análise granulométrica, mediante o objetivo do ensaio.
- Referências bibliográficas:**

Adaptado de: **Methods Book for the Analysis of Compost**. Translation of the 3rd edition, supplemented and revised, January, 2003.

ERSUC Mod. ER25i-030 / Rev. A 1 / 1

Figura 33: Protocolo Laboratorial: Determinação do pH e da condutividade elétrica.

Apêndice D: Teste de *Rottegrad*: acerto do teor de humidade com águas

Nas situações em que teor de humidade fosse inferior a 35%, era adicionada água desionizada à amostra, através da determinação da quantidade de água desionizada a adicionar à amostra fresca. Essa determinação é feita através da **Equação 10** (Methods Book for the Analysis of Compost, 2003).

$$\text{Água a adicionar (ml)} = \frac{1000 \text{ g de composto} \times (35\% - \text{Hr do composto (\%)})}{100\% - 35\%}$$

Equação 10: Acerto do teor de humidade a 35% com água (em que: Hr do composto - humidade real do composto)

Apêndice E: Caracterização da entrada de *pulper*

Na **Tabela 28** encontram-se os resultados de todas as caracterizações, mensais, realizadas durante o período de estudo bem como o desvio padrão das mesmas.

Tabela 28: Caracterização da entrada de *pulper* (CEP - caracterização à entrada de *pulper*)

Amostra	Categoria	Peso (kg)	Fração > 20 mm (%)	Total (%)
CEP ₁	Orgânico cozinha	414	32,96	19,15
	Orgânico jardim	108	8,60	5,00
	Orgânico indiferenciado	36	2,87	1,67
	Madeira	8	0,64	0,37
	Papel	432	34,39	19,98
	Plástico	34	2,71	1,57
	Vidro/Pedra	186	14,81	8,60
	Metal	0	0,00	0,00
	Outros	38	3,03	1,76
	Total > 20	1256	100,00	58,09
	Fração <20mm	906	-	41,91
	Total caracterização	2162	-	100,00
CEP ₂	Orgânico cozinha	672	48,31	22,45
	Orgânico jardim	78	5,61	2,61
	Orgânico indiferenciado	52	3,74	1,74
	Madeira	4	0,29	0,13
	Papel	262	18,84	8,75
	Plástico	66	4,74	2,21
	Vidro/Pedra	142	10,21	4,74
	Metal	13	0,93	0,43
	Outros	102	7,33	3,41
	Total > 20	1391	100,00	46,48
	Fração <20mm	1602	-	53,52
	Total caracterização	2993	-	100,00
CEP ₃	Orgânico cozinha	294	18,35	12,93
	Orgânico jardim	172	10,74	7,56
	Orgânico indiferenciado	182	11,36	8,00
	Madeira	22	1,37	0,97
	Papel	604	37,70	26,56
	Plástico	56	3,50	2,46
	Vidro/Pedra	180	11,24	7,92
	Metal	20	1,25	0,88
	Outros	72	4,49	3,17
	Total > 20	1602	100,00	70,45
	Fração <20mm	672	-	29,55
	Total caracterização	2274	-	100,00

Amostra	Categoria	Peso (kg)	Fração > 20 mm (%)	Total (%)
CEP ₄	Orgânico cozinha	229	22,10	11,68
	Orgânico jardim	125	12,07	6,38
	Orgânico indiferenciado	34	3,28	1,73
	Madeira	31	2,99	1,58
	Papel	363	35,04	18,52
	Plástico	51	4,92	2,60
	Vidro/Pedra	158	15,25	8,06
	Metal	20	1,93	1,02
	Outros	25	2,41	1,28
	Total > 20	1036	100,00	52,86
	Fração <20mm	924	-	47,14
	Total caracterização	1960	-	100,00
CEP ₅	Orgânico cozinha	244,5	24,39	12,35
	Orgânico jardim	100	9,98	5,05
	Orgânico indiferenciado	117	11,67	5,91
	Madeira	17	1,70	0,86
	Papel	295,5	29,48	14,93
	Plástico	81	8,08	4,09
	Vidro/Pedra	137	13,67	6,92
	Metal	6,5	0,65	0,33
	Outros	4	0,40	0,20
	Total > 20	1002,5	100,00	50,64
	Fração <20mm	977	-	49,36
	Total caracterização	1979,5	-	100,00
CEP ₆	Orgânico cozinha	347,5	17,49	11,12
	Orgânico jardim	177	8,91	5,66
	Orgânico indiferenciado	205,5	10,34	6,57
	Madeira	8	0,40	0,26
	Papel	861,5	43,35	27,56
	Plástico	54,1	2,72	1,73
	Vidro/Pedra	209	10,52	6,69
	Metal	32,5	1,64	1,04
	Outros	92	4,63	2,94
	Total > 20	1987,1	100,00	63,56
	Fração <20mm	1139	-	36,44
	Total caracterização	3126,1	-	100,00
CEP _{média}	Orgânico cozinha	366,83	26,58	15,18
	Orgânico jardim	126,67	9,18	5,24
	Orgânico indiferenciado	104,42	7,57	4,32
	Madeira	15,00	1,09	0,62
	Papel	469,67	34,03	19,43
	Plástico	58,02	4,20	2,40

Amostra	Categoria	Peso (kg)	Fração > 20 mm (%)	Total (%)
	Vidro/Pedra	168,67	12,22	6,98
	Metal	15,33	1,11	0,63
	Outros	55,50	4,02	2,30
	Total > 20	1380,10	100,00	57,11
	Fração <20mm	1036,67	-	42,89
	Total caracterização	2416,77	-	100,00
CEP Desvio padrão	Orgânico cozinha	-	11,71	4,69
	Orgânico jardim	-	2,21	1,66
	Orgânico indiferenciado	-	4,32	2,88
	Madeira	-	1,03	0,55
	Papel	-	8,35	7,10
	Plástico	-	2,02	0,90
	Vidro/Pedra	-	2,23	1,38
	Metal	-	0,70	0,43
	Outros	-	2,35	1,26
	Total > 20	-	-	11,73
	Fração <20mm	-	-	8,10
	Total caracterização	-	-	-

Na **Tabela 29** encontram-se as análises físico-químicas realizadas na fração total, fração <20 mm e fração > 20 mm da caracterização à entrada de *pulper*.

Tabela 29: Análise das frações da caracterização de entrada de *pulper* (CEP - caracterização à entrada de *pulper*; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica).

Amostra	Análises físico-químicas											
	Total				Fração <20 mm				Fração > 20 mm			
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)
CEP₁	36,29	19,95	63,71	54,97	50,78	18,07	49,22	35,59	38,57	17,39	61,43	45,07
CEP₂	41,08	22,46	58,92	54,69	54,35	18,70	45,65	34,41	31,84	20,19	68,16	63,42
CEP₃	50,50	32,18	49,50	63,72	48,96	21,03	51,04	42,95	41,99	20,44	58,01	48,68
CEP₄	44,35	19,34	55,65	43,61	51,84	25,33	48,16	48,87	62,22	21,45	37,78	34,47
CEP₅	41,51	17,35	58,49	41,80	45,57	19,90	54,43	43,66	38,86	18,73	61,14	48,19
CEP₆	35,99	23,38	64,01	64,96	51,98	21,73	48,02	41,81	41,41	34,08	58,59	82,30
CEP_{média}	41,62	22,44	58,38	53,96	50,58	20,79	49,42	41,22	42,48	22,05	57,52	53,69

Apêndice F: Análise dos sólidos de centrífuga

Na **Tabela 30** encontram-se as análises físico-químicas realizadas aos sólidos de centrífuga, durante o período de estudo.

Tabela 30: Análise dos sólidos de centrífuga (SC - sólidos de centrífuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; Relação C/N - relação C_{org}/N_t).

Amostra	Análises físico-químicas								
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ρ (g/L)	C_t (% m.s.)	C_{org} (% m.s.)	N_t (% m.s.)	Relação C/N
SC ₁	35,97	16,19	64,03	45,01	586,67	-	-	-	-
SC ₂	35,08	16,13	64,92	45,99	-	-	-	-	-
SC ₃	39,86	18,14	60,14	45,52	-	-	-	-	-
SC ₄	36,02	14,94	63,98	41,49	-	-	-	-	-
SC ₅	26,98	4,27	73,02	15,82	-	-	-	-	-
SC ₆	38,33	17,06	61,67	44,51	-	-	-	-	-
SC ₇	38,76	17,92	61,24	46,23	-	-	-	-	-
SC ₈	32,58	14,98	67,42	45,99	-	-	-	-	-
SC ₉	31,94	15,97	68,06	50,00	916,00	-	-	-	-
SC ₁₀	35,69	15,69	64,31	43,96	-	-	-	-	-
SC ₁₁	35,23	14,54	64,77	41,26	916,00	-	-	-	-
SC ₁₂	35,58	16,45	64,42	46,22	788,00	-	-	-	-
SC ₁₃	38,34	17,82	61,66	46,46	620,00	-	-	-	-
SC ₁₄	32,66	14,72	67,34	45,06	824,00	-	-	-	-
SC ₁₅	35,37	16,43	64,63	46,44	780,00	-	-	-	-
SC ₁₆	35,02	15,99	64,98	45,66	824,00	-	-	-	-
SC ₁₇	35,56	18,01	64,44	50,63	672,00	-	-	-	-
SC ₁₈	30,93	14,65	69,07	47,35	968,00	29,53	32,88	1,691	19,44
SC ₁₉	35,15	15,24	64,85	43,36	684,00	28,49	29,76	1,672	17,80
SC ₂₀	31,84	14,42	68,16	45,30	896,00	27,78	31,85	1,456	21,88
SC ₂₁	36,11	15,22	63,89	42,15	804,00	28,21	25,58	1,458	17,54
SC ₂₂	33,46	15,31	66,54	45,76	824,00	26,62	26,64	1,466	18,17
SC ₂₃	31,97	15,87	68,03	49,63	771,00	26,05	26,31	1,621	16,23
SC ₂₄	37,47	16,38	62,53	43,71	732,00	27,56	29,17	1,667	17,50
SC ₂₅	37,31	17,11	62,69	45,87	686,00	25,38	21,63	1,546	13,99
SC ₂₆	35,61	16,81	64,39	47,22	687,00	27,09	30,76	1,361	22,60
SC ₂₇	36,23	15,61	63,77	43,08	687,00	26,73	26,33	1,507	17,47
SC ₂₈	37,47	18,07	62,53	48,23	672,00	28,63	28,69	1,614	17,78
SC ₂₉	38,66	16,89	61,34	43,69	642,00	26,93	23,50	1,482	15,86
SC ₃₀	33,55	16,41	66,45	48,92	720,00	27,57	33,48	1,394	24,02
SC ₃₁	39,94	19,08	60,06	47,78	572,00	27,58	28,65	1,533	18,69
SC ₃₂	28,33	14,80	71,67	52,25	980,00	29,78	34,40	1,538	22,37
SC ₃₃	34,81	16,66	65,19	47,86	698,00	27,12	27,08	1,519	17,83
SC ₃₄	32,77	15,73	67,23	47,99	779,00	28,67	28,69	1,608	17,84

Amostra	Análises físico-químicas								
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ρ (g/L)	C _t (% m.s.)	C _{org.} (% m.s.)	N _t (% m.s.)	Relação C/N
SC ₃₅	32,69	17,73	67,31	54,22	686,00	31,35	33,93	1,985	17,09
SC ₃₆	32,93	17,43	67,07	52,93	732,00	-	-	-	-
SC ₃₇	35,35	16,71	64,65	47,27	703,00	-	-	-	-
SC ₃₈	38,10	18,71	61,90	49,10	763,00	-	-	-	-
SC _{média}	34,99	16,05	65,01	45,79	756,01	27,84	28,85	1,56	18,56

Apêndice G: Agente de *bulking*

Na **Tabela 31** encontram-se a caracterização granulometria do estruturante recirculado (ER -estilha de madeira de acácia) e na **Tabela 32** encontra-se uma análise pontual realizada ao estruturante novo e ao estruturante recirculado com o intuito de verificar a diferença do teor de humidade entre ambos.

Tabela 31: Caracterização granulométrica do estruturante recirculado (ER - estruturante recirculado; ρ - massa volúmica).

Amostra	Frações			ρ (g/L)
	Fração < 10 (%)	10< Fração< 20 (%)	x > Fração (%)	
ER1	8,01	45,36	46,63	576,00
ER2	17,88	42,09	40,03	-
ER3	8,77	38,39	52,85	-
ER4	10,64	55,49	33,87	-
ER5	8,93	48,67	42,40	-
ER6	10,63	31,08	58,29	620,00
ER7	25,55	51,31	23,14	-
ER8	6,24	54,63	39,13	-
ER9	8,27	49,10	42,64	-
ER10	6,01	51,48	42,51	548,00
ER11	4,53	42,59	52,88	-
ER12	2,65	34,19	63,16	-
ER13	8,82	49,82	41,35	-
ER14	7,07	36,85	56,08	540,00
ER15	23,02	47,21	29,76	-
ER16	4,52	37,47	58,01	-
ER17	9,74	51,86	38,40	-
ER18	13,66	46,77	39,57	-
ER19	3,50	34,92	61,59	504,00
ER _{média}	10,03	44,60	45,38	557,60

Tabela 32: Comparação do teor de humidade do estruturante (ST - sólidos totais; TH - teor de humidade).

Amostra	Análises físico-químicas							
	Total		Fração <10 (mm)		10<Fração <20 (mm)		Fração > 20 (mm)	
	ST (%)	TH (%)	ST (%)	TH (%)	ST (%)	TH (%)	ST (%)	TH (%)
Estruturante recirculado	42,24	57,76	49,41	50,59	41,22	58,78	40,89	59,11
Estruturante novo	74,52	25,48	80,89	19,02	77,81	22,19	79,27	20,73

Apêndice H: Entrada de Túnel

Os resultados relativos às análises físico-químicas realizadas à entrada de túnel, por ensaio, encontram-se na **Tabela 33**.

Tabela 33: Entrada de túnel (I - início da pilha; M - meio da pilha; F - fim da pilha; Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; T - temperatura; CE - condutividade elétrica).

Análises físico-químicas												
Referência	Altura da Pilha (m)	Rácio E:SC	I/M/F	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ρ (g/L)	pH	T °C	CE (mS.cm ⁻¹)	T °C
Ensaio 1	1,50	1:1	I	41,47	18,51	58,53	44,64	784,00	9,35	23,10	3,04	22,30
			F	40,18	17,84	59,82	44,41	800,00	9,18	25,80	3,16	23,00
			M	39,34	14,55	60,66	36,99	800,00	8,86	22,30	3,59	20,90
	1,50	1:1	Média	40,31	16,90	59,69	41,92	794,67	9,13	23,73	3,26	22,07
Ensaio 1'	1,50	1:1	I	37,96	17,89	62,04	47,14	756,00	9,28	21,80	2,98	20,80
			M	37,97	17,65	62,03	46,49	776,00	9,41	21,80	3,05	20,40
			F	39,37	21,37	60,63	54,28	684,00	9,17	21,90	3,01	21,10
	1,50	1:1	Média	38,38	18,83	61,62	49,07	738,67	9,29	21,83	3,01	20,77
Ensaio 2	1,50	2:1	I	35,38	16,70	64,62	47,19	810,00	9,15	20,20	3,38	19,50
			M	39,66	19,37	60,34	48,84	645,00	9,18	22,30	2,78	20,20
			F	38,83	20,30	61,17	52,28	720,00	9,14	21,10	3,16	20,10
	1,50	2:1	Média	37,77	18,71	62,23	49,53	725,00	9,16	21,20	3,11	19,93
Ensaio 2'	1,50	2:1	I	38,34	18,47	61,66	48,17	710,00	9,08	23,30	3,04	21,20
			M	35,56	17,78	64,44	50,00	844,00	8,96	22,9	3,69	21,00
			F	39,05	19,11	60,95	48,92	744,00	9,55	21,60	2,86	20,90
	1,50	2:1	Média	37,64	18,44	62,36	49,01	770,00	9,20	22,45	3,20	21,03
Ensaio 3	1,80	2:1	I	41,42	19,67	58,58	47,49	649,00	9,26	27,80	2,71	26,20

Análises físico-químicas												
Referência	Altura da Pilha (m)	Rácio E:SC	I/M/F	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ρ (g/L)	pH	T °C	CE (mS.cm ⁻¹)	T °C
			M	38,98	19,20	61,02	49,25	802,00	9,08	27,20	3,51	25,70
			F	37,91	17,53	62,09	46,25	802,00	8,72	30,10	3,18	26,70
	1,80	2:1	Média	39,23	18,71	60,77	47,70	751,00	9,02	28,37	3,13	26,20
Ensaio 3'	1,80	2:1	I	39,05	17,88	60,95	45,79	808,00	8,99	27,90	2,92	25,80
			M	37,69	17,83	62,31	47,32	779,00	8,99	27,80	2,87	26,10
			F	39,73	31,57	60,27	79,47	817,00	8,78	27,20	3,1	25,90
	1,80	2:1	Média	38,78	22,10	61,22	56,99	801,33	8,92	27,63	2,96	25,93
Ensaio 4	2,00	2:1	I	40,16	19,68	59,84	49,00	756,00	9,34	27,10	2,92	25,40
			M	39,75	20,20	60,25	50,82	712,00	9,25	25,80	2,82	24,90
			F	50,07	27,94	49,93	55,80	500,00	8,77	25,90	2,37	24,90
	2,00	2:1	Média	42,10	21,70	57,90	51,54	656,00	9,12	26,27	2,70	25,07
Ensaio 4'	2,00	2:1	I	41,18	20,11	58,82	48,84	653,00	9,31	26,70	2,68	25,50
			M	35,31	17,06	64,69	48,33	767,50	9,07	27,10	3,06	25,80
			F	39,15	19,17	60,85	48,97	612,00	9,11	27,70	2,63	26,00
	2,00	2:1	Média	38,18	18,59	61,82	48,68	677,50	9,16	27,17	2,79	25,77

Na **Tabela 34** encontram-se os resultados das análises físico-químicas realizadas no Laboratório de Solos e Fertilidade da ESAC.

Tabela 34: Entrada de túnel (continuação) (I - início da pilha; M - meio da pilha; F - fim da pilha; Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrifuga; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; C/N - relação C_{org}/N_t).

Análises físico-químicas							
Referência	Altura da Pilha (m)	Rácio E:SC	I/M/F	C _t (% m.s.)	C _{org.} (% m.s.)	N _t (% m.s.)	Relação C/N
Ensaio 3	1,80	2:1	I	-	-	-	-
			M	23,22	22,03	1,325	16,63
			F	23,22	22,03	1,325	16,63
			Média	23,22	22,03	1,33	16,63
Ensaio 3'			I	-	-	-	-
			M	28,66	27,31	1,502	18,18
			F	27,27	27,17	1,481	18,35
			Média	27,97	27,24	1,49	18,26
Ensaio 4	2,00		I	28,35	26,25	1,498	17,52
			M	-	-	-	-
			F	26,38	24,93	1,401	17,79
			Média	27,37	25,59	1,45	17,66
Ensaio 4'			I	27,49	25,73	1,373	18,74
			M	27,49	25,73	1,373	18,74
			F	29,13	27,67	1,603	17,26
			Média	28,04	26,38	1,45	18,25

Apêndice I: Em túnel - monitorização do túnel no SCADA

A **Tabela 35**, tem como objetivo mostrar como os túneis foram monitorizados pelo *software SCADA* remotamente. Os túneis foram todos monitorizados da mesma forma, pelo que só vai ser apresentado um exemplar. O túnel escolhido para representar, representa o Ensaio 3, com uma altura de 1,80 m e um rácio de 2:1.

Os chefes de turno consultavam diariamente o *software SCADA* e, registavam a média diária dos parâmetros referidos na folha de cálculo do *software Microsoft Excel*. O ficheiro *Excel* estava predefinido para quando a temperatura fosse igual ou superior a 55°C, sublinhar os valores de temperatura de modo a que os chefes de turno contabilizem os requisitos de temperatura e passassem da fase de Esterilização à fase de Compostagem no *SCADA*. Ao domingo com o TMB não funciona não há registo de dados. O *SCADA* guarda todos os dados registados, e deixa visualizar gráficos com as variáveis.

Tabela 35: Visualização de um túnel de compostagem no *software* SCADA.

Túnel 7								
Data	Fase	Temperatura Porta (°C)	Temperatura de fundo (°C)	O ₂ porta (%)	O ₂ Fundo (%)	Tempo c/ rega (s) – Tempo s/ rega (s)	Tempo c/ ventilação (s)/ Tempo s/ ventilação(s)	OBS
27-05-2015	Encher							
28-05-2015	Encher							
29-05-2015	Encher							
30-05-2015	Encher							
31-05-2015								
01-06-2015	Esterilização	40,60	38,10	20,50	11,20	0	180/7200	
02-06-2015	Esterilização	48,10	42,80	20,30	13,00	0	300/7200	
03-06-2015	Esterilização	52,10	47,10	20,40	9,80	0	300/7200	
04-06-2015	Esterilização	52,99	51,85	20,35	13,90	0	300/7200	
05-06-2015	Esterilização	54,80	57,70	20,20	8,30	0	300/7200	
06-06-2015	Esterilização	55,20	61,80	20,50	6,70	0	300/7200	
07-06-2015								
08-06-2015	Esterilização	56,90	66,13	20,50	8,90	0	300/7200	
09-06-2015	Esterilização	56,90	67,50	20,50	10,17	0	300/7200	
10-06-2015	Esterilização	56,90	68,30	20,40	11,10	0	300/7200	
11-06-2015	Compostagem	57,30	69,40	20,50	11,90	0	300/7200	
12-06-2015	Compostagem	57,00	69,90	20,30	12,80	0	300/7200	
13-06-2015	Compostagem	57,39	70,46	20,37	12,46	0	300/7200	

Túnel 7								
Data	Fase	Temperatura Porta (°C)	Temperatura de fundo (°C)	O ₂ porta (%)	O ₂ Fundo (%)	Tempo c/ rega (s) – Tempo s/ rega (s)	Tempo c/ ventilação (s)/ Tempo s/ ventilação(s)	OBS
14-06-2015								
15-06-2015	Compostagem	57,70	71,10	20,40	12,70	0	300/7200	
16-06-2015	Compostagem	46,50	69,70	20,50	13,90	0	900/7200	
17-06-2015	Compostagem	43,30	67,50	20,50	12,30	0	900/7200	
18-06-2015	Compostagem	41,20	65,40	20,70	12,30	0	900/7200	
19-06-2015	Compostagem	39,90	63,80	20,80	12,60	0	900/7200	
20-06-2015	Compostagem	38,10	61,20	20,70	15,40	0	900/7200	
21-06-2015								
22-06-2015	Compostagem	36,00	56,30	20,50	17,30	0	1200/7200	
23-06-2015	Esvaziar	32,30	52,00	20,60	16,20	0	1200/7200	
24-06-2015	Vazio							

Apêndice J: Em túnel - análise dos dados fornecidos pelo SCADA por ensaio para a fase Compostagem e para uma análise geral

Na **Tabela 36** estão demonstrados os resultados obtidos para a fase de compostagem através do *software SCADA*. Na **Tabela 37** estão demonstrados os resultados obtidos para uma análise geral das fases de esterilização/higienização e compostagem através do *software SCADA*.

Tabela 36: Análise dos dados obtidos pelo SCADA na fase de compostagem (Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga).

Referência	Condições		Fase: Compostagem											
	Altura da Pilha (m)	Rácio E:SC	Dias	O ₂ (%)			Tempo c/ rega (s) / Tempo s/ rega (s)	Tempo c/ ventilação (s) / Tempo s/ ventilação (s)			Temperatura (°C)			Observações
				Máximo	Mínimo	Média		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	
Ensaio 1	1,50	1:1	3	20,83	16,30	18,12	0	180/7200	180/7200	180/7200	52,08	42,61	49,61	
Ensaio 1'			0	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	
Ensaio 2	1,50	2:1	8	18,90	17,04	18,20	0	120/7200	120/7200	120/7200	54,75	51,40	53,14	
Ensaio 2'			14	18,84	8,80	16,58	0	1200/7200	300/7200	675/7200	61,44	56,90	59,29	
Ensaio 3	1,80		13	20,80	11,90	17,08	0	1200/7200	300/7200	736,36/7200	71,10	32,30	55,61	
Ensaio 3'			3	14,83	12,07	13,16	0	600/7200	300/7200	450/7200	62,38	56,32	59,34	
Ensaio 4	2,00		23	20,10	2,04	10,86	0	1200/7200	300/7200	1005/7200	65,05	36,80	52,07	
Ensaio 4'			15	20,00	2,60	8,33	0	1200/7200	240/7200	1080/7200	65,50	48,80	57,48	

Tabela 37: Análise geral dos dados obtidos pelo SCADA durante as fases de esterilização/higienização e compostagem.

Referência	Condições		Fase: Análise Geral												Normal/Forçada
	Altura da Pilha (m)	Rácio E:SC	Dias	O ₂ (%)			Tempo c/ rega (s) / Tempo s/ rega (s)	Tempo c/ ventilação (s) / Tempo s/ ventilação (s)			Temperatura (°C)			OBS	
				Máximo	Mínimo	Média		Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média		
Ensaio 1	1,50	1:1	36	20,83	5,70	17,82	0	600/7200	0/7200	263,13/7200	71,10	36,50	57,72		C.F. II (*) (**)
Ensaio 1'			49	20,11	11,36	18,02	0	1200/7200	120/7200	550/7200	54,90	35,23	48,92	E1'	C.F. II
Ensaio 2	1,50	2:1	49	20,34	12,90	18,44	0	600/7200	120/7200	258,57/7200	57,90	29,27	50,26	E2	C.F. II (**)
Ensaio 2'			24	18,84	4,59	13,99	0	1500/7200	180/7200	621/7200	61,44	48,25	57,57		C.F. I
Ensaio 3	1,80		23	20,80	6,70	16,31	0	1200/7200	180/7200	534/7200	71,10	32,30	54,98	E3	C.F. I
Ensaio 3'			37	16,30	10,50	13,73	0	600/7200	180/7200	439,35/7200	62,49	31,20	49,05		C.F. I
Ensaio 4	2,00		30	20,10	2,04	9,45	0	1200/7200	300/7200	842,31/7200	65,05	36,80	52,60		C.F. I
Ensaio 4'			34	21,08	0,00	7,49	0	1200/7200	180/7200	626,9/7200	65,50	32,70	53,32		
OBS: E1' - As duas sondas de temperatura mediram valores muito próximos dos 55° C; E2 – As temperaturas registadas numa das sondas não estavam a subir e houve a necessidade de abrir o túnel, verificando-se um abatimento ligeiro da altura da pilha e que a sonda se tinha movido. Após a correta colocação da sonda a temperatura começou a subir, mas não atingiu os 55° C. E3 – Numa das sonda, foi registada a temperatura de 71,10 ° C, mas já no passo 2 – compostagem. Normal/Forçada: Compostagem Normal (C.N.) – temperatura de 70° C durante 2h; Compostagem Forçada I (C.F. I) – temperaturas ≥ 55 ° C e ≤ 70 ° C durante 5 dias; Compostagem Forçada II (C.F. II) - temperatura próxima de 55° C (mas não chega a atingir). (*) A temperatura numa das sondas foi ≥ 70° C durante 2h; (**) Numa das sondas a compostagem foi do tipo C. F. I, mas a média das temperaturas resultou em C.F. II.															

Apêndice K: Saída de túnel

Na **Tabela 38** são apresentados os resultados obtidos, por ensaio, à saída de túnel reator.

Tabela 38: Saída de túnel (I - início da pilha; M - meio da pilha; F - fim da pilha; Rácio E:SC - rácio estruturante: sólidos de centrífuga; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; T - temperatura; CE - condutividade elétrica).

Análises físico-químicas												
Referência	Altura da Pilha (m)	Rácio E:S.C.	I/M/F	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (%)	ρ (g/L)	pH	T °C	CE (mS.cm ⁻¹)	T °C
Ensaio 1	1,50	1:1	F	40,98	16,64	59,02	40,61	668,00	9,4	25,6	2,67	23,60
			M	54,15	19,83	45,85	36,61	672,00	8,9	25,20	2,62	24,10
			I	39,84	14,06	60,16	35,29	840,00	9,14	26,00	2,44	24,80
	1,50	1:1	Média	44,59	16,71	55,41	37,47	726,67	9,14	25,60	2,58	24,17
Ensaio 1'	1,50	1:1	F	38,91	14,77	61,09	37,96	700,00	8,39	22,50	2,71	22,30
			M	39,26	12,94	60,74	32,96	768,00	9,14	24,30	3,06	23,30
			I	44,09	16,22	55,91	36,78	888,00	9,23	24,30	3,01	23,20
	1,50	1:1	Média	40,64	14,60	59,36	35,93	785,33	8,92	23,70	2,93	22,93
Ensaio 2	1,50	2:1	F	35,93	15,29	64,07	42,57	748,00	8,93	24,20	2,98	22,90
			M	39,36	18,02	60,64	45,78	968,00	8,68	25,20	3,45	23,60
			I	37,50	17,49	62,50	46,64	852,00	8,99	26,60	3,59	24,20
	1,50	2:1	Média	37,68	17,02	62,32	45,18	856,00	8,87	25,33	3,34	23,57
Ensaio 2'	1,50	2:1	F	37,98	16,67	62,02	43,88	836,00	9,3	22,20	3,17	20,90
			M	43,04	20,31	56,96	47,19	784,00	9,01	23,90	3,00	21,60
			I	37,26	15,35	62,74	41,20	764,00	9,32	23,60	2,99	21,90
	1,50	2:1	Média	39,40	17,41	60,60	44,19	794,67	9,21	23,23	3,05	21,47
Ensaio 3	1,80	2:1	F	38,94	17,21	61,06	44,20	710,00	8,94	24,40	3,12	23,50

Análises físico-químicas												
Referência	Altura da Pilha (m)	Rácio E:S.C.	I/M/F	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (%)	ρ (g/L)	pH	T °C	CE (mS.cm ⁻¹)	T °C
			M	35,67	18,11	64,33	50,79	751,00	8,17	25,70	2,25	23,40
			I	38,11	17,02	61,89	44,66	712,00	8,83	25,50	2,87	23,50
	1,80	2:1	Média	37,53	17,48	62,47	46,58	724,33	8,67	25,20	2,75	23,47
Ensaio 3'	1,80	2:1	F	53,15	21,74	46,85	40,89	590,00	7,72	23,50	2,77	22,70
			M	38,19	19,00	61,81	49,74	816,00	8,84	24,80	4,22	22,90
			I	37,26	16,42	62,74	44,07	806,00	9,95	26,00	3,65	24,80
	1,80	2:1	Média	42,13	18,82	57,87	44,66	737,33	8,84	24,77	3,55	23,47
Ensaio 4	2,00	2:1	F	37,73	15,85	62,27	42,01	620,00	8,98	27,10	2,60	25,90
			M	51,18	24,76	48,82	48,37	466,00	8,01	27,10	3,19	25,60
			I	38,35	16,07	61,65	41,91	737,00	9,02	27,00	2,76	25,20
	2,00	2:1	Média	41,10	18,01	58,90	43,83	607,67	8,67	27,07	2,85	25,57
Ensaio 4'	2,00	2:1	F	39,48	15,66	60,52	39,66	647,00	8,84	25,80	2,57	23,80
			M	42,40	16,73	57,60	39,46	765,00	8,87	23,70	2,83	22,00
			I	38,98	17,56	61,02	45,05	622,00	8,84	24,90	2,51	22,70
	2,00	2:1	Média	40,36	16,64	59,64	41,23	678,00	8,85	24,80	2,64	22,83

Apêndice L: Composto maturado

Os resultados relativos à maturação do composto encontram-se apresentados na **Tabela 39**.

Tabela 39: Composto maturado (CM - composto maturado; ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; C_t - carbono total; C_{org} - carbono orgânico; N_t - azoto total; Relação C/N - relação C_{org}/ N_t).

Amostra	Análises físico-químicas							
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	C _t (% m.s.)	C _{org} (% m.s.)	N _t (% m.s.)	Relação C/N
CM ₁	47,06	19,43	52,94	41,28	-	-	-	-
CM ₂	66,24	22,19	33,76	33,49	-	-	-	-
CM ₃	52,09	19,25	47,91	36,95	-	-	-	-
CM ₄	52,63	22,92	47,37	43,55	-	-	-	-
CM ₅	48,93	20,12	51,07	41,13	-	-	-	-
CM ₆	52,21	20,77	47,79	39,77	-	-	-	-
CM ₇	51,06	20,87	48,94	40,88	-	-	-	-
CM ₈	50,51	18,78	49,49	37,19	-	-	-	-
CM ₉	51,57	20,81	48,43	40,35	-	-	-	-
CM ₁₀	52,68	21,70	47,32	41,18	24,06	21,44	1,35	15,88
CM ₁₁	51,05	19,72	48,95	38,63	23,44	21,85	1,379	15,84
CM ₁₂	51,27	19,99	48,73	38,98	22,74	21,09	1,307	16,14
CM ₁₃	56,27	24,70	43,73	43,89	23,26	22,83	1,398	16,33
CM ₁₄	51,91	19,64	48,09	37,83	23,35	22,58	1,584	14,26
CM ₁₅	53,91	21,79	46,09	40,42	24,28	23,79	1,444	16,48
CM ₁₆	56,46	23,85	43,54	42,25	24,13	21,34	1,417	15,06
CM ₁₇	50,19	23,85	49,81	47,52	26,05	24,74	1,388	17,82
CM ₁₈	58,88	26,87	41,12	45,64	24,59	23,48	1,417	16,57
CM ₁₉	50,35	18,77	49,65	37,29	25,89	25,2	1,434	17,57
CM ₂₀	50,54	21,02	49,46	41,59	25,37	24,95	1,355	18,41
CM ₂₁	62,22	21,30	37,78	34,24	25,49	24,91	1,374	18,13
CM ₂₂	53,18	22,34	46,82	42,02	25,76	24,07	1,327	18,14
CM ₂₃	51,85	20,59	48,15	39,72	23,60	21,39	1,348	15,87
CM ₂₄	56,10	22,33	43,90	39,80	23,59	22,41	1,303	17,20
CM ₂₅	51,05	20,39	48,95	39,95	23,10	21,79	1,314	16,58
CM ₂₆	54,35	20,73	45,65	38,15	21,42	22,02	1,355	16,25
CM ₂₇	50,23	22,39	49,77	44,58	25,18	23,22	1,373	16,91
CM ₂₈	48,24	20,05	51,76	41,57	-	-	-	-
CM _{média}	52,97	21,33	47,03	40,35	24,18	22,95	1,38	16,64

Apêndice M: Grau de Maturação - Teste de *Rottegrad*

Os resultados semanais relativos ao grau de maturação de acordo com o Teste de *Rottegrad* encontram-se na **Tabela 40**.

Tabela 40: Grau de maturação (CMR - composto maturado *Rottegrad*; ST - sólidos totais; TH - teor de humidade; T - temperatura; nível V e IV - composto maduro).

Amostra	Análises físico-químicas		Avaliação da estabilidade/maturação	
	ST (%)	TH (%)	<i>Rottegrad</i>	
			T máxima (°C)	Nível
CMR ₁	58,64	41,36	21,60	V
CMR ₂	58,64	41,36	24,30	V
CMR ₃	54,61	45,39	26,80	V
CMR ₄	55,24	44,76	24,10	V
CMR ₅	56,95	43,05	24,30	V
CMR ₆	53,25	46,75	24,30	V
CMR ₇	52,45	47,55	26,40	V
CMR ₈	51,45	48,55	24,40	V
CMR ₉	56,84	43,16	26,50	V
CMR ₁₀	52,68	47,32	25,80	V
CMR ₁₁	52,59	47,41	24,30	V
CMR ₁₂	51,97	48,03	30,80	IV
CMR ₁₃	51,05	48,95	25,70	V
CMR _{média}	54,33	45,67	25,33	V

Apêndice N: Composto afinado

As análises mensais realizadas ao composto afinado podem ser consultadas na **Tabela 41**.

Tabela 41: Composto afinado (CA - composto afincado; ST- sólidos totais; SV - sólidos voláteis; TH - teor de humidade; MO - matéria orgânica; ρ - massa volúmica; pH; T - temperatura; CE - condutividade elétrica).

Amostra	Análises físico-químicas								
	ST (%)	SV (%)	TH (%)	MO (% m.s.)	ρ (g/L)	pH	T °C	CE (mS.cm ⁻¹)	T °C
CA ₁	52,15	19,15	47,85	36,72	516,00	8,44	21,60	2,71	20,03
CA ₂	54,06	21,46	45,94	39,70	524,00	8,17	24,10	2,96	23,00
CA ₃	52,39	18,72	47,61	35,73	560,00	8,88	22,40	2,32	21,90
CA ₄	53,27	18,43	46,73	34,59	529,00	9,1	28,40	2,24	26,50
CA ₅	58,94	22,04	41,06	37,39	539,00	7,88	24,30	2,57	22,20
CA _{média}	54,05	19,90	45,95	36,82	533,60	8,49	24,16	2,56	22,73

Apêndice O: Análises externas realizadas ao composto final

Na **Tabela 42**, encontra-se as análises trimestrais realizadas, aos lotes de composto afinado, em laboratório externo acreditado pelo IPAC. No lote 1 e 2 de 2015, aparece somente a Amostra 1 e Amostra 5, respetivamente, porque as restantes quatro ensaios foram apenas para determinar a existência de *Escherichia coli* e *Salmonella*, e os resultados foram iguais às restantes determinações, <10 ufc/g e negativo, respetivamente.

Tabela 42: Análises externas realizadas ao composto final.

Ensaio	Norma	Unidades	Data de receção da amostra: 22-12-2014					Data de receção da amostra: 09/03/2015	Data de receção da amostra: 04/06/2015	Média
			Lote 4 - 2014					Lote 1 - 2015	Lote 2 - 2015	
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 1	Amostra 5	
Enxofre (*)	PO.L.LABQUI-5.4/R02: Ed.A, Rev.04	mg S/kg de m. s.	5,80E+03	5,20E+03	4,40E+03	4,20E+03	4,30E+03	4,20E+03	6,40E+03	4,93E+03
Material estranho	Methods book for the analysis of compost (2002) FCQAO e BGK pp. 44-47	%	1,9	1,32	1,3	1,23	1,98	0,94	0,70	1,34
Pedras (**)		%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,01
Inertes	Cálculo	%	1,90	1,32	1,30	1,23	2,04	0,94	0,70	1,35
Granulometria malha > 20 mm	Methods book for the analysis of compost (2002) FCQAO e BGK pp. 44-47	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Granulometria malha < 20 mm e > 10 mm		%	0,31	0,44	0,47	0,1	2,06	0,48	0,26	0,59
Granulometria malha < 10 mm e > 5 mm		%	5,18	3,88	4,99	3,62	3,16	3,78	2,56	3,88
Granulometria malha < 5 mm e > 2 mm		%	25,61	21,55	22,26	20,92	22,31	30,55	30,56	24,82
Granulometria malha < 2 mm e > 1 mm		%	27,58	26,63	29,31	27,23	25,09	31,97	30,93	28,39
Granulometria malha < 1 mm		%	41,32	47,5	42,97	48,13	47,38	33,22	35,69	42,32
Grau de maturação	Gutezeichen Kompost RAL-GZ 251 (1992)		V (20,5°C)	V (19,1°C)	V (20,9°C)	V (20,3°C)	V (20,1°C)	V (21,5°C)	V (28,7°C)	V (21,6° C)

Ensaio	Norma	Unidades	Data de receção da amostra: 22-12-2014					Data de receção da amostra: 09/03/2015	Data de receção da amostra: 04/06/2015	Média
			Lote 4 - 2014					Lote 1 - 2015	Lote 2 - 2015	
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 1	Amostra 5	
Humidade	EN 13040:2007	%	37,00	37,00	36,00	37,00	34,00	46,00	42,00	38,43
Matéria seca	EN 13040:2007	%	63,00	63,00	64,00	63,00	66,00	54,00	59,00	61,71
Avaliação da Germinação de infestantes e partes de plantas (***)	TC BT 151 WI: 2007	/	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Ensaio de Fitotoxicidade (****)	Zucconi et al (1981)	/	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
COT	PO.L.LABQUI-5.4/R12: Ed.A, Rev.04	mg C /kg	1,70E+05	1,70E+05	1,70E+05	1,30E+05	1,70E+05	1,60E+05	1,50E+05	1,62E+05
Mercurio	EN 13346:2000	mg Hg/kg	0,52	0,49	0,54	0,52	0,50	0,61	0,45	0,53
Salmonela	ISO 6579:2002.Amd 1:2007. Cr 1:2004		Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Escherichia coli	ISO 16649-2:2001	ufc/g	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Matéria Orgânica	EN 13039:2011	%	40,00	35,00	35,00	35,00	35,00	41,00	42,00	36,83
pH	EN 13037:2011	Escala de Sorensen	7,90	8,70	8,40	8,40	8,80	8,60	8,50	8,47
Condutividade	EN 130398:2011	µs/cm	2,00E+02	1,50E+02	1,40E+02	1,30E+02	1,50E+02	1,90E+02	1,70E+02	1,60E+02
Azoto total	EN 13654-1:2001	g/kg	12,00	6,80	8,20	8,00	7,90	15,00	22,00	9,65E+00
Fosforo Total	EN 13650:2001	mg P/kg	7,40E+03	8,40E+03	8,30E+03	7,90E+03	8,10E+03	8,30E+03	7,30E+03	8,07E+03
Potássio Total		mg K/kg	7,90E+03	7,80E+03	8,00E+03	9,50E+03	7,70E+03	7,90E+03	7,20E+03	8,13E+03
Cálcio Total		mg Ca/kg	8,80E-01	8,40E+04	7,70E+04	7,10E+04	7,60E+04	7,80E+04	7,80E+04	6,43E+04
Magnésio Total		mg Mg/kg	1,40E+04	1,70E+04	1,60E+04	1,40E+04	1,60E+04	1,50E+04	1,50E+04	1,53E+04
Cobre Total		mg Cu/kg	1,70E+02	1,70E+02	1,60E+02	1,60E+02	1,70E+02	1,60E+02	1,20E+02	1,65E+02

Ensaio	Norma	Unidades	Data de receção da amostra: 22-12-2014					Data de receção da amostra: 09/03/2015	Data de receção da amostra: 04/06/2015	Média
			Lote 4 - 2014					Lote 1 - 2015	Lote 2 - 2015	
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 1	Amostra 5	
Zinco Total		mg Zn/kg	4,00E+02	4,10E+02	4,00E+02	3,60E+02	4,10E+02	4,10E+02	3,80E+02	3,98E+02
Boro		mg B/kg	52,00	47,00	48,00	47,00	48,00	50,00	45,00	48,67
Cádmio Total		mg Cd/kg	0,88	0,89	0,86	0,79	0,82	0,78	0,83	0,84
Crómio Total		mg Cr/kg	65,00	69,00	110,00	60,00	67,00	53,00	49,00	70,67
Níquel Total		mg Ni/kg	52,00	51,00	51,00	46,00	51,00	44,00	42,00	49,17
Chumbo Total		mg Pb/kg	1,90E+02	1,90E+02	2,20E+02	1,70E+02	2,00E+02	1,70E+02	1,20E+02	1,90E+02
Massa volúmica aparente	Método Interno (baseado EN 12580)	g/L	5,50E+02	5,40E+02	6,20E+02	6,30E+02	6,20E+02	6,20E+02	6,00E+02	5,97E+02
Observações: (*) Vidro, plástico, metais, borracha, etc. com partículas de dimensão superior a 2 mm. (**) Pedras com dimensão superior a 5 mm. (***) - Avaliação Germinação: Segundo o método WI CSS 99048 o resultado é de 1 planta/L (quando é <3 plantas por Litro, o resultado é Negativo). (****) - Fitotoxicidade: segundo o método Zucchini et al, 1981, o resultado é GI = 100 % (se GI> 80% o resultado é negativo). 'EN' indica European Normalization, 'PO.L-LABQUI' *' indica método interno do laboratório baseado, se indicado, no (s) documento (s) normativo (s), 'ISO' indica International Organization for Standardization.										

Apêndice P: Sugestão de uma brochura de compostagem

Neste apêndice encontram-se a **Figura 34** e a **Figura 35**, que são referentes à sugestão de brochura de compostagem, como forma de sensibilização da população para a prática de compostagem.



Figura 34: Sugestão de brochura de compostagem (página 1/2).



Figura 35: Sugestão de brochura de compostagem (página 2/2).